



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓSGRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E
CONCRETOREFORÇADO COM FIBRAS POR MEIO DO ENSAIO DE VIGA**

Jamille Cândida Cunha Couto

ORIENTADOR: Prof^o Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício

São Cristóvão

2016

Jamille Cândida Cunha Couto

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS POR MEIO DO ENSAIO DE VIGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, como parte necessária para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

ORIENTADOR: Profº Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício

São Cristóvão

2016

JAMILLE CÂNDIDA CUNHA COUTO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRA DE AÇO E
CONCRETO POR MEIO DO ENSAIO DE VIGA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, como parte necessária para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

São Cristóvão, 29 de agosto de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício
Orientador

Prof^a Dra. Angela Teresa Costa Sales
(Examinador Interno)

Prof^o Dr. Emerson Figueiredo dos Santos
(Examinador Externo)

Dedico este trabalho especialmente ao
meu pai (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS.

Primeiramente a Deus.

A minha mãe, Zuleica Couto, pela presença e apoio na minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício por estes anos de orientação.

Agradeço também aos colegas de mestrado pelos conhecimentos divididos Anna Cristina Araujo, Fernanda Melo e Diego Faro.

Ao técnico de Laboratório de Materiais e Estruturas, Bruno Kevin, foram muitos dias em que me ajudou muito.

Aos amigos e familiares do meu dia-a-dia que me ouviram e me encorajaram muito nesse tempo de ansiedade.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que participaram desde o início do Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo.

Uma vaga noção de tudo, e um conhecimento de nada.

Charles Dickens

RESUMO

Uma das premissas fundamentais para funcionamento do concreto armado como material estrutural é a existência de aderência entre o concreto e o aço. O fenômeno de aderência funciona como um mecanismo de transferência de esforços e ainda assegura a compatibilidade de deformações na interface aço-concreto. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da aderência entre concreto de resistência convencional e reforçado com fibras metálicas. Para tanto foi utilizado o ensaio de viga ou *beam test*, de acordo com a norma RILEM RC5 (1982) para este tipo de ensaio de aderência. Foram moldadas vigas, com barras de aço de 10 mm. O concreto empregado utilizou fibras de aço com ganchos nas extremidades, com fator de forma igual a 80, comprimento igual a 60 mm e fração volumétrica de 1%, fabricada pela Maccaferri no Brasil. O concreto teve resistência à compressão de 30 MPa. Os resultados experimentais apontaram que para o teor utilizado, as fibras metálicas influenciaram a tensão última de aderência. Também foram realizadas comparações com modelos teóricos existentes

Palavras-chave: Aderência aço-concreto, Concreto, Ensaio de viga, Fibras de aço.

ABSTRACT

The fundamental condition to reinforced concrete like a building material is the bond between steel and concrete. The phenomenon of bond works as a transfer mechanism of efforts and allows the strain compatibility in the steel-concrete interface. This work aims to study the bond of steel bars embedded in plain fiber reinforced concrete. Beam test was employed in accordance with RILEM RC5 (1982). Steel bars had 10 mm diameter and fibers were hooked-end with aspect ratio of 80. The fiber volume fraction 1% and the concrete compressive strength 30 MPa. The tests results show that for the fiber content employed the bond strength increase. The theoretical bond-slip models were confronted with experimental values.

Keywords: Bond, Concrete, Beam test, Steel fiber, Bond-slip.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	22
2.1	GENERALIDADES.....	22
2.2	TENSÕES DE ADERÊNCIA	25
2.3	FISSURAÇÃO E ADERÊNCIA	26
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA	28
2.4.1	Composição e resistência do concreto.....	29
2.4.2	Cobrimento do concreto	29
2.4.3	Diâmetro da barra.....	29
2.4.4	Adição de fibras no concreto.....	32
2.4.5	Posição das barras na concretagem	34
2.4.6	Conformação superficial da barra	36
2.5	MODOS DE RUPTURA DA ADERÊNCIA.....	37
2.6	TIPOS DE ENSAIOS DE ADERÊNCIA	39
2.6.1	Ensaio de arrancamento direto (<i>pull-out test</i>)	39
2.6.2	Ensaio de arrancamento RILEM RC6 (1983)	43
2.6.3	Ensaio de arrancamento RHEM (1979)	44
2.6.4	Ensaio de arrancamento ASTM C-234 (1991).....	44

2.6.5	Ensaio de flexão (<i>beam test</i>)	46
2.6.6	Ensaio de extremo de viga (<i>beam end test</i>)	48
2.6.7	Ensaio de tração direta (tirante).....	49
2.6.8	Ensaio das quatro barras.....	50
2.6.9	Ensaio de empuxamento (<i>push-out</i>)	51
2.7	PRESCRIÇÃO NORMATIVA SEGUNDO ABNT NBR 6118:2014.....	53
3	MODELOS TEÓRICOS	55
3.1	EQUAÇÃO DIFERENCIAL DA ADERÊNCIA	55
3.2	MODELO DE BARBOSA (2001)	57
3.3	MODELO DE ALMEIDA (2006)	58
3.4	MODELO DE HARAJLI ET AL. (1995)	59
3.5	MODELO CEB-FIP (1990)	60
3.6	MODELO DE HUANG ET AL (1996)	63
4	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	65
4.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	65
4.2	CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS (CRF)	66
4.3	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)	73
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	81
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	81
5.1.1	MATERIAIS	81
	Cimento Portland.....	82
	Agregados	82
	Fibras metálicas.....	83

Água de amassamento.....	84
Aditivo.....	84
5.1.2 DOSAGEM DOS MATERIAIS	85
5.1.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA	85
5.2 AÇO	86
5.3 ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	86
5.3.1 Geometria dos modelos	86
5.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova	91
5.3.3 Instrumentação e aplicação do carregamento.....	92
5.3.4 Realização dos ensaios	93
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	98
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	98
6.1.1 Estado fresco	98
6.1.2 Estado endurecido - resistência à compressão do concreto.....	99
6.2 ENSAIO DE VIGA.....	100
6.2.1 Resultados do ensaio de viga - carga x deslizamento.....	100
6.2.2 Resultados experimentais <i>versus</i> modelos teóricos para a curva de aderência <i>versus</i> deslizamento.....	102
6.2.3 Resultados ensaio de viga x ensaio de arrancamento e empuxamento.....	110
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
BIBLIOGRAFIA.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aderência por adesão	22
Figura 2.2 - Aderência por atrito.....	23
Figura 2.3 - Aderência mecânica.....	24
Figura 2.4 - Rugosidade superficial de diversas barras de armadura nervuradas e fios lisos, ampliada 36 vezes	24
Figura 2.5 - Correlação entre $\tau_b - s$ em aços lisos e nervurados para concretos	25
Figura 2.6 - Fissuração por tração.....	26
Figura 2.7 - Fissuração estabilizada	27
Figura 2.8 - Microfissuração do concreto	28
Figura 2.9 - Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal, devido à exsudação e ao acúmulo de água.....	35
Figura 2.10 - Resultados dos ensaios de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem.....	36
Figura 2.11 - Superfície relativa da nervura.....	36
Figura 2.12 - Representação gráfica dos modos de ruptura por arrancamento (a) e por fendilhamento (b).....	37
Figura 2.13 - Fendilhamento longitudinal do concreto	38
Figura 2.14 - Armadura para evitar fissuras de fendilhamento na ancoragem reta.....	38
Figura 2.15 - Corpos-de-prova para o ensaio de arrancamento e as respectivas variações da tensão ao longo do comprimento de aderência.....	40
Figura 2.16 - Comportamento da tensão de aderência	41
Figura 2.17 - Elemento infinitesimal dx	41
Figura 2.18 - Prisma para ensaio de arrancamento	43
Figura 2.19 - Prisma para ensaio de arrancamento	44
Figura 2.20 - Prisma para ensaio de arrancamento com barra vertical	45
Figura 2.21 - Prisma para ensaio de arrancamento com barras horizontais	45

Figura 2.22 - Modelo de viga padronizado para $\varnothing < 16 \text{ mm}$	47
Figura 2.23 - Modelo de viga padronizado para $\varnothing \geq 16 \text{ mm}$	47
Figura 2.24 - Instrumentação do modelo de viga	48
Figura 2.25 - Ensaio de extremidade de viga	49
Figura 2.26 - Modelos de tirantes.....	50
Figura 2.27 - Esquema geral de ensaio desenvolvido na USP	51
Figura 2.28 - Detalhe do corpos de prova <i>pull-out</i> e método de ensaio.....	51
Figura 2.29 - Detalhe do corpos de prova <i>pull-out</i> e método de ensaio.....	52
Figura 3.1 - Aderência aço-concreto	55
Figura 3.2 - Relação tensão de aderência versus deslizamento.....	59
Figura 3.3- Tensão de aderência x deslizamento	61
Figura 4.1 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões.....	69
Figura 4.2 - Fibras adequadas x propriedades da matriz.....	70
Figura 4.3 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão	70
Figura 4.4 - Distribuição possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.....	71
Figura 4.5 - Definição do fator de forma da fibra	72
Figura 4.6 - Representação esquemática da zona de transição entre a paste de cimento e o agregado	73
Figura 4.7 - Exemplos de aplicação de concretos reforçados com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) radier	74
Figura 4.8 - Distribuição de fibras de aço por tipo de aplicação no Brasil	74
Figura 4.9 - Superfície fraturada do CRFA.....	75
Figura 4.10 - Diferentes tipos de fibras de aço.....	75
Figura 4.11 - Características geométricas de algumas fibras de aço.....	76
Figura 4.12 - Fibras de aço com extremidades deformadas, coladas em forma de pentes.....	77
Figura 4.13 - Fibras de aço com extremidades deformadas, produzidas soltas	77

Figura 4.14 - Concreto com fibras onde há compatibilidade entre fibras e agregado graúdo.....	79
Figura 4.15 - Concreto com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e agregado graúdo	79
Figura 4.16 - Fibras de aço longas (a) e curtas (b)	80
Figura 5.1 - Fibras de aço Wirand FF4	84
Figura 5.2 - Adição das fibras metálicas	86
Figura 5.3–Geometria da fôrma para o modelo de viga.....	87
Figura 5.4 - Formas desmontáveis de madeira compensada plastificada.....	87
Figura 5.5 - Formas do modelo de viga	88
Figura 5.6 - Barra para ensaio de aderência com trecho não-aderente.....	88
Figura 5.7 - Detalhe da armadura do modelo de viga do (barra de 10 mm.....	89
Figura 5.8– Armadura pronta do modelo usado na viga	89
Figura 5.9 - Formas e armação usadas na produção das vigas	90
Figura 5.10 - Vigas prontas para serem concretadas.....	90
Figura 5.11 - Rótula do modelo de ensaio de viga.....	91
Figura 5.12 - Corpos de prova com barra de 10 mm prontos para o ensaio de viga	91
Figura 5.13 - Corpos de prova de viga moldados.....	92
Figura 5.14 - Corpos de prova em cura úmida.....	92
Figura 5.15 - Instrumentação do modelo de viga.....	93
Figura 5.16 - Aplicação do carregamento para o modelo de viga.....	93
Figura 5.17 - Prensa manual Marcon, modelo MPH 30.....	94
Figura 5.18 - Manômetro do macaco hidráulico graduado a cada 0,5 toneladas	94
Figura 5.19 - Anel dinanométrico para calibração	95
Figura 5.20 - Equação para correção das cargas	95
Figura 5.21 - Relógios comparadores a) e suportes magnéticos b).....	96
Figura 5.22 - Acompanhamento do deslocamento da barra.....	96
Figura 5.23 - Distâncias em que os apoios ficaram posicionados na viga	97
Figura 5.24 - Ensaio de viga.....	97

Figura 6.1 - Ensaio de resistência à compressão.....	99
Figura 6.2–(a) Corpo de prova de concreto convencional (b) Corpo de prova de concreto reforçado com fibras, após ensaio de compressão axial.....	100
Figura 6.3 - Corpos-de-prova de vigas com perda de aderência por deslizamento.....	101
Figura 6.4 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de BARBOSA (2001)	104
Figura 6.5 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de ALMEIDA (2006).....	104
Figura 6.6 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de CEB-FIP (1990)	105
Figura 6.7 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de HUANG et al (1996)	105
Figura 6.8 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de BARBOSA (2001)	107
Figura 6.9 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de ALMEIDA (2006).....	107
Figura 6.10 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de viga com fibras e modelo de CEB-FIP (1990)	108
Figura 6.11 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de HUANG et al (1996)	108
Figura 6.12 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de HARAJLI (1995).....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tensões máximas de aderência, diferentes diâmetros.....	30
Tabela 2.2 - Resultados experimentais.....	30
Tabela 2.3 - Resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento, modelos das classes 30, 60 e 90 MPa	32
Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento	33
Tabela 2.5 - Resultados ensaio de aderência (<i>pull-out</i> e <i>push-out</i>).....	52
Tabela 3.1 - Parâmetros da curva de aderência x deslizamento para barras rugosas	62
Tabela 3.2 - Parâmetros da curva tensão de aderência x deslizamento para barras lisas	63
Tabela 3.3 - Parâmetros da curva tensão de aderência x deslizamento	63
Tabela 4.1 - Papéis da matriz e reforço num compósito	66
Tabela 4.2 - Principais características das fibras utilizadas como reforço em concreto	68
Tabela 4.3 - Diversas aplicações do concreto reforçado com fibras	78
Tabela 5.1 - Nomenclatura e quantidade dos corpos-de-prova de vigas	81
Tabela 5.2 - Características do agregado miúdo	82
Tabela 5.3 - Características do agregado graúdo	83
Tabela 5.4 - Características técnicas das fibras de aço usada.....	83
Tabela 5.5 - Características técnicas do superplastificante Viscocrete 5800 FTN (http://bra.sika.com/dms/getdocument.get/34a88f6c-a343-3665-b4cedebaf224a541/Sika%20ViscoCrete%205800%20FTN.pdf)	84
Tabela 5.6 - Consumo dos materiais na confecção do concreto.....	85
Tabela 6.1 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone	98
Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios de compressão médios, desvios padrões e coeficientes de variação para os corpos de prova CC e CRFA	99
Tabela 6.3 - Carga máxima aplicada aos corpos-de-prova durante o ensaio de viga.....	101
Tabela 6.4 - Valores máximos da tensão de aderência e deslocamento atingidos pelos modelos teóricos e o valor médio experimental da viga sem fibras	106

Tabela 6.5 - Valores máximos da tensão de aderência e deslocamento atingidos pelos modelos teóricos e o valor médio experimental da viga com fibras	109
Tabela 6.6 - Valores experimentais de tensão de aderência para concreto convencional	111
Tabela 6.7 - Valores experimentais de tensão de aderência para concreto reforçado com fibras de aço	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde o início da utilização do concreto armado, a aderência entre aço e concreto é tema de estudo de várias pesquisas e com uma vasta quantidade de trabalhos experimentais e teóricos difundidos nesse sentido. Essa solidariedade entre os dois materiais possibilita que aconteça a transmissão de esforços e a compatibilidade de deformações entre eles, permitindo que se comporte como um só material. Segundo Le Huang et al (2016), o desempenho da aderência entre barras de aço e a matriz de concreto envolvente tem uma influência significativa no comportamento mecânico das estruturas de concreto armado.

A hipótese fundamental do concreto armado está baseada na transferência de esforços entre a armadura e o concreto. Isso é possível devido à iminência de escorregamento relativo entre os dois materiais, sendo que a resistência ao escorregamento é entendida como resistência de aderência ou simplesmente aderência. A tensão de aderência, atuante na interface formada pelo concreto e a armadura é comumente utilizada para identificar a aderência entre os dois materiais (ROSSI, 2002).

Uma das contribuições mais importantes da aderência é garantir uma boa capacidade de utilização da estrutura, através da limitação da abertura de fissuras, e uma melhor distribuição dessas ao longo da peça, podendo evitar flechas excessivas e rupturas localizadas (FERNANDES, 2000).

Teoricamente, a aderência pode ser decomposta em três parcelas: adesão, atrito e aderência mecânica. Essas parcelas decorrem de diferentes fenômenos relativos à ligação entre aço e concreto (FUSCO, 1995). Essa divisão da aderência é apenas teórica, pois não é possível separar cada uma delas.

Segundo Fusco (1995), a parcela de aderência por adesão corresponde às ligações físico-químicas na interface das barras com a pasta, que se constituem durante as reações de pega do cimento, relacionada à resistência de separação entre os dois materiais.

O atrito é dado pelo coeficiente relativo entre o aço e concreto, devido à rugosidade da superfície das barras. As forças de atrito surgem assim que a aderência por adesão é rompida, porém, desde que ainda existam tensões transversais às armaduras em virtude de cargas externas, retração ou expansão do concreto (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977). A aderência mecânica surge por conta da conformação superficial das barras, ou seja, está relacionada à forma da superfície da armadura.

A aderência é influenciada por variáveis associadas à barra de aço e ao próprio concreto. Em relação à barra: diâmetro, forma e disposição das nervuras, posição das barras da armadura em relação à direção de concretagem. No que se refere ao concreto citam-se: fator água/cimento, tipo de agregado, adições minerais, presença de fibras, forma de adensamento e a idade do carregamento. Destacam-se dois tipos de ensaios no estudo da aderência: o ensaio de arrancamento (*pull-out*) e o ensaio de viga.

O concreto reforçado, seja com barras ou fios de aço, é um exemplo de material composto, também chamado de compósito (FIGUEIREDO, 2011). O concreto simples é um compósito que possui como fases a pasta, os poros e agregados. Porém, são mais constantemente considerados compósitos, os materiais que tenham algum tipo de reforço. Desta forma, o concreto com fibras e o concreto armado são compósitos que apresentam uma matriz frágil e algum tipo de reforço.

Correia (2012) menciona que, no concreto reforçado com fibras, a adição aleatória destas proporciona um comportamento dúctil, já que torna maior a capacidade de absorção de energia conferida pelas fibras. A presença das fibras tende a retardar o início e propagação das fissuras, ou seja, aumentam a tensão correspondente à primeira fissura da matriz. Na condição de pós-fissuração inicial, as fibras “costuram” e interrompem a progressão das microfissuras, impedindo então a ruptura brusca. Logo, acrescentar fibras em regiões de ancoragem pode favorecer a resistência das ligações, desde que projetadas corretamente.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é estudar o fenômeno da aderência de barras de aço no concreto convencional e reforçado com fibras por meio do ensaio de viga.

Os objetivos específicos são:

- Investigar o comportamento de aderência em vigas de concreto armado, com barra de estudo de aderência de diâmetro de 10 mm, usando concreto convencional e concreto reforçado com fibras, por meio de curvas que traçam a relação tensão de aderência x deslizamento;
- Analisar comparativamente o comportamento da aderência aço-concreto entre os corpos-de-prova (vigas) com a presença de fibras de aço e sem a incorporação de fibras;
- Verificar a aplicação de modelos teóricos existentes na literatura com os resultados obtidos experimentalmente;

- Comparar os resultados obtidos com outros tipos de ensaios, obtidos na literatura técnica.

1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos mais importantes materiais já desenvolvidos pelo homem. É reconhecido por sua facilidade de produção e versatilidade, como excelente material de construção. Ele tem, entretanto, a desvantagem de ser um material frágil, com baixa resistência à tração e, por esse motivo, nas últimas décadas tem havido empenho de pesquisadores e tecnólogos do concreto em melhorar a resistência à tração e a ductilidade do concreto.

O fenômeno de aderência entre aço e concreto, que foi aqui estudado, é de extrema importância, já que é um dos mecanismos que possibilita a existência do concreto armado. No entanto, aderência entre aço e concreto envolve outras variáveis que ainda não têm sua influência totalmente estabelecida. Em virtude disso, mostram-se necessárias mais informações a respeito do comportamento da aderência entre aço e concreto e ainda o estudo da variável do concreto com adição de fibras.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 mostra resumidamente uma introdução ao estudo de aderência no concreto armado e concreto reforçado com fibras, os objetivos, a justificativa e a estrutura da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma análise sobre a aderência entre aço e concreto e os principais ensaios aplicados para desenvolver a relação tensão de aderência x deslizamento encontrados na literatura.

No capítulo 3, são apresentados alguns modelos teóricos segundo a literatura que definem a curva tensão de aderência *versus* deslizamento.

O capítulo 4 mostra uma revisão bibliográfica sobre a adição de fibras metálicas em concreto como reforço.

No capítulo 5 é descrita a investigação experimental que foi realizada dos ensaios de caracterização dos materiais e da aderência aço-concreto, para o concreto convencional e o concreto reforçado com fibras, em modelos de viga.

No capítulo 6, são mostrados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização do concreto e do ensaio de viga e os modelos teóricos da literatura usados neste trabalho, por meio de curvas tensão de aderência *versus* deslizamento.

O capítulo 7 traz as conclusões fundamentais dos resultados gerados nesta pesquisa, e ainda, sugestões para futuras pesquisas acerca do assunto aderência aço-concreto.

2 ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

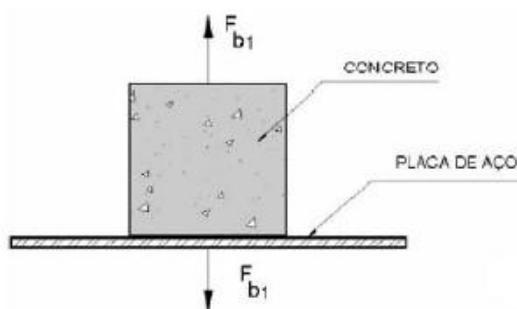
Neste capítulo são apresentados inicialmente os princípios sobre a aderência entre o aço e o concreto, os fatores que influenciam na sua atuação, os principais sistemas de mobilização e de ruptura envolvidos e os ensaios de aderência normalmente utilizados.

2.1 GENERALIDADES

A aderência pode ser compreendida como a união entre o concreto e a armadura, formando então um só elemento, que funcionam conjuntamente absorvendo os esforços solicitantes, mantendo a armadura ancorada no concreto e permitindo a transferência de tensões entre eles. Se não houvesse o fenômeno de aderência entre os dois materiais de resistência diferentes, a estrutura funcionaria apenas como um concreto simples, já que as barras estariam livres dentro da massa de concreto. O concreto e a armadura apresentam as mesmas deformações até que a tensão limite no concreto seja atingida. Após este valor, nas regiões onde predominam as tensões de tração, é a aderência que impede o deslocamento relativo entre os dois materiais. Esta ação solidária entre os materiais é o que caracteriza o concreto armado e o define como um material estrutural (TAVARES, 2012).

Teoricamente a aderência se divide em três contribuições: a aderência por adesão, por atrito e mecânica. A aderência química, ou por adesão, é comprovada pela resistência à separação dos dois materiais, quando se tenta separar um bloco concretado diretamente em contato com uma placa de aço (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Aderência por adesão

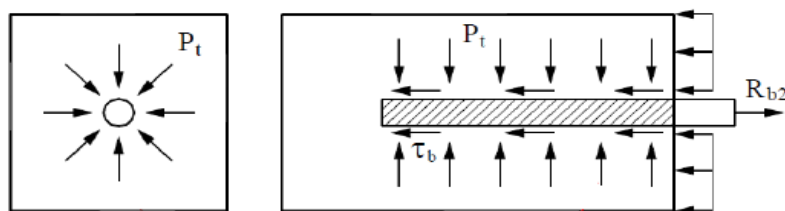


Fonte: FUSCO (1995)

Por conta das ligações físico-químicas que se estabelecem na interface dos dois materiais durante as reações de pega do cimento, aparece uma certa resistência de adesão R_{b1} (bond = aderência) que se opõe à separação dos dois materiais (FUSCO,1995). Leonhardt e Mönning (1977), afirmam que uma vez rompida a adesão, para o menor deslocamento relativo, aparece uma resistência de atrito entre o aço e o concreto, desde que existam pressões transversais às armaduras. A aderência por atrito é dada pelo coeficiente de atrito entre o aço e concreto e é função da rugosidade da superfície da barra.

Fusco (1995) explica que para o ensaio de arrancamento de uma barra de aço mergulhada no concreto (Figura 2.2), percebe-se que a força de arrancamento R_{b2} é significativamente superior aos limites que podem ser previstos a partir da resistência R_{b1} , parcela por adesão. Esse acréscimo de aderência é em virtude das forças de atrito, que decorrem da existência de uma pressão transversal p_t exercida pelo concreto sobre a barra, devido a sua retração. A presença da barra inibe parcialmente as deformações de retração do concreto, daí surgindo a pressão transversal que provoca o acréscimo de aderência.

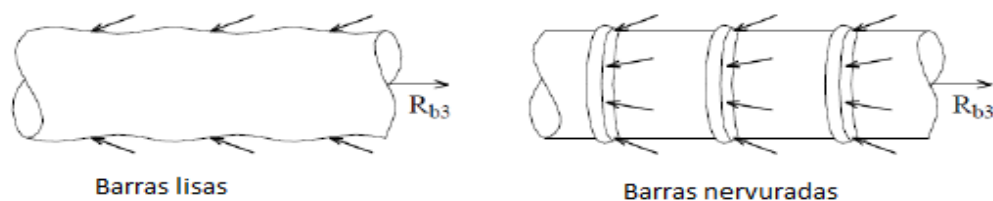
Figura 2.2 - Aderência por atrito



Fonte: FUSCO (1995)

A última parcela da aderência, a aderência mecânica, existe devido à presença de nervuras na superfície da barra. Durante o movimento relativo das barras, surgem tensões de compressão perpendiculares às saliências, tendo a aderência mecânica maior atuação em manter a barra de aço ancorada, oferecendo certa resistência pós-pico (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Aderência mecânica



Fonte: FUSCO (1995)

De acordo com Brisotto (2011), estas forças de compressão provocam a microfissuração e o esmagamento do concreto na região das nervuras. Com o aumento do escorregamento, as forças de atrito presentes sofrem rápida redução, tornando a aderência mecânica a principal responsável pela aderência de barras nervuradas. Nas barras lisas que dependem essencialmente da adesão química e por atrito, também existe a aderência mecânica, em menor valor, devido às irregularidades superficiais do processo de laminação.

Leonhardt & Mönning (1977) aponta que mesmo que se tenha uma barra lisa, esta pode apresentar aderência mecânica, devido ao efeito da oxidação e o processo de fabricação das barras de aço provoca uma rugosidade superficial. Para comparação, a Figura 2.4 expõe as superfícies microscópicas de barra de aço enferrujada, barra recém laminada e fio de aço obtido por laminação a quente e posterior encruamento a frio por estriamento.

Figura 2.4 - Rugosidade superficial de diversas barras de armadura nervuradas e fios lisos, ampliada 36 vezes

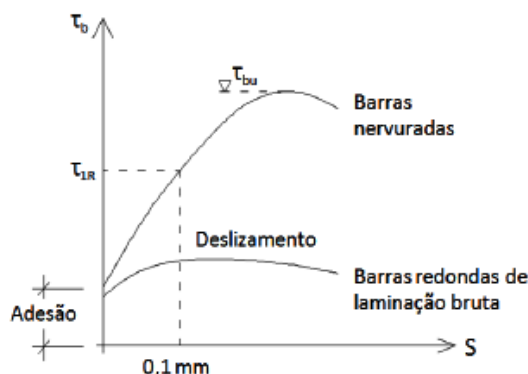


Fonte: LEONHARDT & MÖNNIG (1977)

Curvas esquemáticas da relação tensão de aderência *versus* deslizamento ($\tau_0 \times s$) são apresentadas por alguns autores, separando as parcelas resistentes da aderência. A

Figura 2.5 a seguir é um exemplo representativo do comportamento local de barras lisas e nervuradas.

Figura 2.5 - Correlação entre $\tau_b - s$ em aços lisos e nervurados para concretos



Fonte: LEONHARDT & MÖNNIG (1977)

2.2 TENSÕES DE ADERÊNCIA

A tensão de aderência entre aço e concreto se distribui ao longo da superfície de contato entre os dois materiais e é definida, quantitativamente, pela relação tensão de aderência x deslizamento. Ou seja, essa relação é definida pela variação de tensão ao longo da ligação aço-concreto, em função do deslocamento relativo entre estes dois materiais.

Correia (2012) cita que as tensões de aderência nos elementos estruturais de concreto armado aparecem sempre que houver variação de deformação das barras em um determinado trecho. De acordo com Leonhardt & Mönnig (1977) as causas das variações de tensão podem ser as seguintes:

- Cargas: as ações externas modificam as tensões de tração e compressão do aço;
- Fissuras: maior concentração de tensões de aderência nas regiões de descontinuidade;
- Forças de ancoragem nas extremidades das barras: a força que aparece na barra é transferida ao concreto através de tensões de aderência;
- Variações de temperatura: as barras de aço, em incêndio, por exemplo, aquecem mais rápido e dilatam-se mais em relação ao concreto, sendo inibidas pela aderência dos dois materiais. Podendo acontecer que em casos extremos, as tensões de aderência cheguem a valores tão elevados que rompe o cobrimento de concreto;
- Retração do concreto: causado pela presença do aço, em que esta impede a deformação de retração do concreto, fazendo que surjam tensões de tração no concreto e tensões de compressão nas barras;

- Deformação lenta do concreto em peças comprimidas de concreto armado (pilares): nesse caso as barras de aço suportam um acréscimo de tensões de compressão o que acaba aliviando o concreto.

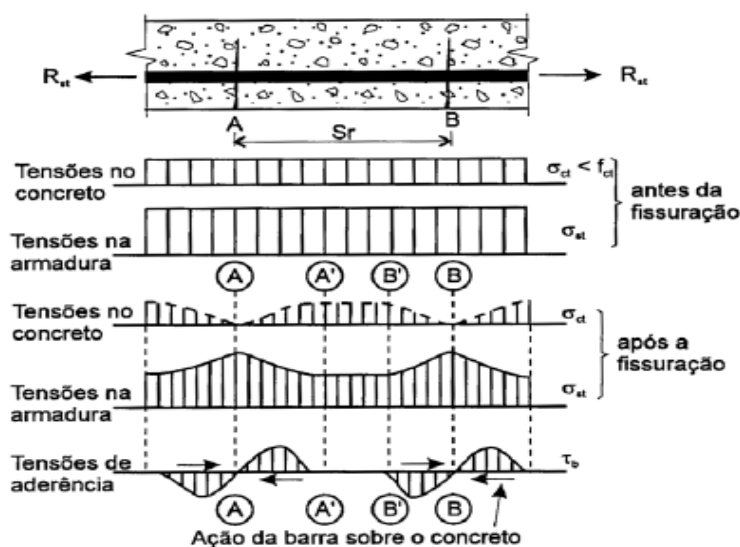
2.3 FISSURAÇÃO E ADERÊNCIA

A ligação entre armadura e concreto permite que as tensões de tração sejam transferidas ao aço. Isso é fundamental no controle da abertura das fissuras. Segundo Castro (2002) quanto maior a aderência entre os dois materiais, maior a possibilidade de se ter um maior número de fissuras, no entanto, com menor abertura individual das mesmas, favorecendo então as condições de proteção da armadura.

Fusco (1995) explica um modelo que representa a forma de mobilização da aderência numa peça de concreto armado. Neste modelo, ele não considerou a microfissuração que resulta em deslizamentos localizados próximos da fissura principal.

Para valores de solicitações mais baixas, o concreto não apresenta fissuração e resiste às tensões de tração, considerando que o concreto esteja no estágio I. Aumentando as solicitações o concreto chega ao estágio II, nesse momento é superada a resistência à tração do concreto e se iniciam as fissuras da peça nas fibras mais tracionadas (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Fissuração por tração



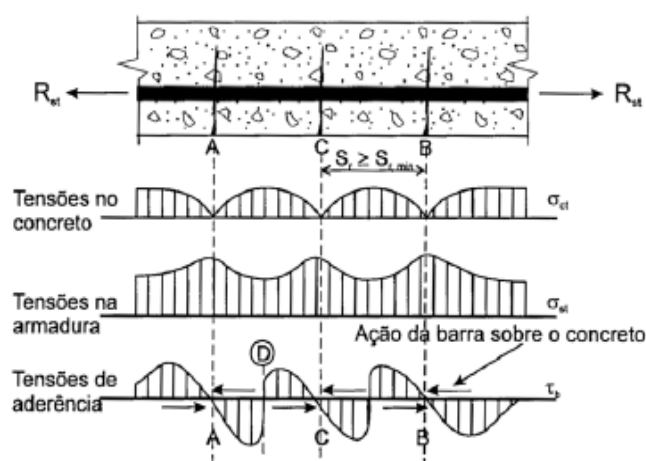
Fonte: FUSCO(1995)

Numa seção fissurada, todas as tensões de tração são absorvidas só pela armadura. É nessa situação que a tensão na armadura atinge seu valor máximo. Em seções mais distantes das

fissuras, a tensão de tração vai se reduzindo, e devido à aderência, o concreto volta a ser tracionado.

No modelo apresentado na Figura 2.6, adotou-se apenas a presença de duas fissuras A e B que estão afastadas entre si pela distância S_r . São nos trechos AA' e BB' onde a tensão de aderência atinge seu valor máximo, logo, no trecho A'B' as tensões se desenvolvem no concreto e na armadura. Uma nova fissura C pode se formar com o aumento da sollicitação externa (Figura 2.7).

Figura 2.7 - Fissuração estabilizada

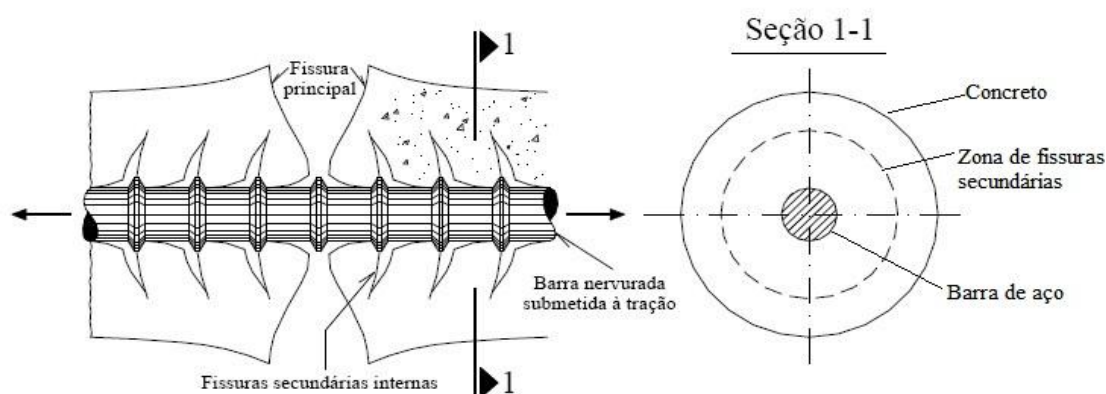


Fonte: FUSCO (1995)

Surgindo essa nova fissura C, a tensão no concreto σ_{ct} é então transferida para a armadura tracionada. Nos trechos AD e DC, as tensões de aderência assumem seus valores máximos. Armadura e concreto trabalham em conjunto, este último com tensão de tração inferior ao limite de ruptura f_{ct} (resistência à tração), assim não havendo formação de fissuras entre A e C.

Goto (1971) apresentou um modelo do processo de fissuração no concreto. De acordo com a Figura 2.8, ocorre uma maior microfissuração do concreto que envolve a barra de aço.

Figura 2.8 - Microfissuração do concreto



Fonte: GOTO (1971)

Na Figura 2.8, é possível observar que entre as fissuras principais, também chamadas de fissuras de Goto, existem fissuras secundárias internas e, como resultado, perda de aderência por adesão. Essas fissuras secundárias são consequência da mobilização da aderência e são chamadas de fissuras de aderência, ou ainda, transversais. As fissuras transversais mudam de orientação entre duas fissuras principais vizinhas.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A ADERÊNCIA

O fenômeno da aderência é dado em função de vários fatores físicos e mecânicos, relacionados, principalmente, à armadura, ao concreto e aos esforços em ambos os materiais.

A seguir são listados os principais fatores que influenciam no comportamento de aderência (FERNANDES, 2000). Alguns serão detalhados mais adiante:

1. Propriedades do concreto como resistência e composição granulométrica;
2. Configuração da superfície da barra da armadura (lisa, nervurada, tipo e forma das nervuras e até o estado da superfície das barras);
3. Tipos de aço;
4. Tensão de escoamento do aço;
5. Quantidade de barras numa mesma camada;
6. Posição das barras durante a concretagem, vertical, inclinada, horizontal;
7. Localização das barras em relação à seção de concreto durante a concretagem (em cima, no centro, embaixo);

8. Relação entre direção da concretagem e direção do carregamento, que definem se o deslizamento é na mesma direção ou em direção oposta à concretagem;
9. Cobrimento e espaçamento das barras de armadura;
10. Comprimento de ancoragem;
11. Quantidade e posição da armadura transversal;
12. Tipo, velocidade e duração do carregamento;
13. Número e amplitude de carregamentos cíclicos;
14. Temperatura.

2.4.1 Composição e resistência do concreto

Tojal (2011) afirma que qualquer alteração no traço do concreto, desde que não altere a resistência à compressão, nem a resistência à tração, não provocará mudança no comportamento de aderência. No entanto, deve-se ter cuidado na composição do concreto. Por exemplo, em concretos com agregados muito finos, as partículas finas e a água se concentram nas regiões próximas da barra, fazendo com que esta região tenha menor resistência. E assim, quando a barra for solicitada será mais fácil o esmagamento do concreto por compressão junto às laterais das nervuras. A resistência mecânica do concreto é considerada como um dos fatores que mais influencia na aderência. Em geral, para valores maiores de resistência mecânica do concreto, maiores serão as tensões de aderência resistidas na interface aço-concreto.

2.4.2 Cobrimento do concreto

A influência do cobrimento da armadura e do espaçamento entre suas barras, está relacionada ao confinamento pelo concreto, sendo a utilização de valores adequados essenciais para se evitar a ruptura por fendilhamento.

Segundo Santana (2014), o cobrimento do concreto pode influenciar na tensão última de aderência e a forma de ruptura do concreto. Para valores maiores de cobrimento e espaçamento entre as barras, há um aumento do volume de concreto e conseqüentemente da tensão de aderência. Quanto mais elevado o valor de cobrimento, a ruptura se dará por arrancamento da barra, devido ao corte e o esmagamento do concreto próximo às nervuras. No entanto, cobrimento de concreto menor, o concreto estará mais sujeito a desenvolver fissuras ocasionadas pelas tensões radiais de tração, rompendo prematuramente o concreto por fendilhamento.

2.4.3 Diâmetro da barra

Trabalhos experimentais realizados por Simplício (2008) mostraram que as barras com diâmetros menores obtiveram maior tensão de aderência do que os corpos de prova com barras de diâmetro maiores, em concretos sem presença de fibras (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Tensões máximas de aderência, diferentes diâmetros

f_c (MPa)	\varnothing (mm)	τ_{max} (MPa)
64	6,3	40,0
	10,0	35,9
	12,5	41,4
	16,0	34,0
80	8,0	37,4
	10,0	39,4
	12,5	40,0
	16,0	39,6
110	10,0	28,0
	12,5	29,1
	16,0	29,3

Fonte: SIMPLÍCIO (2008)

Já para os concretos reforçados com fibras, a variação do diâmetro não se mostrou significativa. No entanto, notou-se que para um mesmo percentual de fibras e resistência mecânica, houve um acréscimo da tensão final τ_f , à medida que se aumenta o diâmetro da barra Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resultados experimentais

f_c (MPa)	V_f (%)	\varnothing (mm)	τ_{max} (MPa)	τ_f (MPa)
64	0,5	8	43,6	12,58
		10	44,3	21,49
		12,5	59,6	19,18
		16	48,1	24,78
	0,75	8	49,7	19,44
		10	46,6	21,56
		12,5	53,2	20,7
		16	50,2	29,92
64	1	8	43,2	8

f_c (MPa)	V_f (%)	\varnothing (mm)	τ_{max} (MPa)	τ_f (MPa)
64	1	10	49,9	8,1
		12,5	49,6	20
		16	52,7	32
80	0,5	8	55,2	16
		10	53	17
		12,5	52,4	20
		16	50	29
	0,75	8	51,9	25
		10	54,1	16,8
		12,5	54,9	30,4
		16	49,9	28
	1	8	53	15
		10	53,2	23,5
		12,5	56,3	29
		16	51,2	32
110	0,5	8	56,5	19
		10	61,7	32
		12,5	58,5	35
		16	53,4	34,7
	0,75	8	57,9	14
		10	67,3	36
		12,5	57,5	32
		16	59,7	39
	1	8	59,6	22
		10	66	29
		12,5	59,2	37
		16	55,6	37

Fonte: SIMPLÍCIO (2008)

O fato de se reduzir a tensão de aderência com o aumento do diâmetro é justificado pela espessura da zona de transição que se torna maior nas barras de maior diâmetro. Além disso, maiores dimensões das nervuras retêm mais água na região de contato aço-concreto, tornando assim esta região mais porosa e o esmagamento do concreto em contato com a barra acontece de forma mais fácil. Almeida (2006) afirmou que, assim como a resistência à compressão do concreto, o diâmetro da barra tem forte influência nos resultados da resistência de aderência. Em sua pesquisa concluiu que menor diâmetro da barra significa maior resistência de aderência. Soroushian & Choi (1989) *apud* Correia (2012) verificaram que o diâmetro das barras exerce pouca influência na variação da resistência última de aderência e na curva tensão de aderência x

deslizamento. Na pesquisa destes autores, a tensão última de aderência e o diâmetro das barras são inversamente proporcionais.

2.4.4 Adição de fibras no concreto

O efeito da adição de fibras no concreto pode ser considerado um confinamento, similar ao efeito da armadura transversal, e tem como principal função melhorar a ductilidade do compósito. Além disso, outro objetivo do uso de fibras de aço incorporadas ao concreto em relação à aderência é retardar o surgimento de fissuras. De acordo com Simplício (2008), a adição de fibras aumenta, significativamente, a tensão máxima de aderência em relação ao concreto sem fibra. O autor analisou concretos de mesma resistência mecânica e diâmetro, variando apenas os teores de fibras. Já Santana (2014), em sua pesquisa, usou dois tipos de fibras metálicas, uma fibra longa de comprimento de 25 mm e uma microfibras de 13 mm, e diferentes teores, F0 (sem fibras), F0,5 + f0,5 (0,5% de fibras de 25 mm e 0,5 % de fibras de 13 mm), F1,0 (fibras de 25 mm) e F1,5 (fibras de 13 mm) e concreto com diferentes resistências, 30, 60 e 90 MPa, Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento, modelos das classes 30, 60 e 90 MPa

Classe de Resistência (MPa)	Diâmetro (mm)	Tipo e Teor de fibras	$\tau_{b (ult)}$ (MPa)	$\tau_{b (ult)}$ Relativo
30	10	F0	15,19	1
		F0,5 + f0,5	17,23	1,13
		F1,0	19,84	1,31
		F1,5	17,08	1,12
	16	F0	22,8	1
		F0,5 + f0,5	18,05	0,79
		F1,0	23,59	1,03
		F1,5	20,7	0,91
60	10	F0	27,48	1
		F0,5 + f0,5	26,09	0,95
		F1,0	25,17	0,92
		F1,5	29,56	1,08
	16	F0	32,83	1

Classe de Resistência (MPa)	Diâmetro (mm)	Tipo e Teor de fibras	$\tau_{b (ult)}$ (MPa)	$\tau_{b (ult)}$ Relativo
60	16	F0,5 + f0,5	27,9	0,85
		F1,0	31,97	0,97
		F1,5	30,23	0,92
90	10	F0	46,2	1
		F0,5 + f0,5	43,63	0,94
		F1,0	45,33	0,98
		F1,5	42,91	0,93
	16	F0	48,51	1
		F0,5 + f0,5	47,51	0,98
110	16	F1,0	50,48	1,04
		F1,5	46,89	0,97

Fonte: SANTANA (2014)

Pode-se observar que as fibras metálicas apresentaram pouca influência na tensão última de aderência. Foram observados pequenos decréscimos nos valores deste parâmetro para os corpos-de-prova com fibras, exceto para os espécimes da classe de 30 MPa, com barra de 10 mm, onde houve acréscimo da tensão última de aderência em 13%, 31% e 12%, respectivamente, para todas as taxas de fibras.

Em relação ao teor de fibras, Yazici e Arel (2012), estudaram como a adição de fibras de aço atua na força de arrancamento em corpos de prova cúbicos, com aresta de 150 mm. No estudo, usaram como variáveis a quantidade de fibras adicionadas, o fator de forma, resistência do concreto e a espessura do cobrimento, Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento

Classe de Resistência do Concreto (MPa)	Fator de Forma da Fibra	Fibras de Aço (kg/m³)	Espessura de cobrimento do concreto (mm)		
			t = 40	t = 55	t = 70
C20	l/d = 40	0	26,1	30,2	30,2
		10	26,3	30,5	30,5
		20	26,6	30,5	30,9
		30	26,8	30,7	31,1
		40	27,4	31,7	31,6
		60	27,7	32,7	31,9
		80	27,9	33,3	32,9

Classe de Resistência do Concreto (MPa)	Fator de Forma da Fibra	Fibras de Aço (kg/m³)	Espessura de cobrimento do concreto (mm)		
			t = 40	t = 55	t = 70
C20	l/d = 80	10	26,9	30,6	31,5
		20	27,2	30,8	31,7
		30	28,1	31	32
		40	29	31,7	32,7
		60	29,8	32,9	33,2
		80	30,2	33,9	34,3
C40	l/d = 40	0	33,1	37,2	39
		10	33,3	37,7	39,5
		20	33,6	38	40,4
		30	34,1	38,5	40,8
		40	34,3	38,7	41,1
		60	34,6	38,9	41,3
		80	35,4	39,3	41,9
	l/d = 80	10	34	37,9	40
		20	34,4	39,1	40,5
		30	34,6	39,8	41,1
		40	35,1	40	41,3
		60	35,3	40,7	42,5
		80	36	41,8	43,3
C60	l/d = 40	0	39,1	41,3	45,1
		10	39,8	42,1	46
		20	40,5	42,5	46,8
		30	41,3	43,6	47,8
		40	41,8	44,1	48,2
		60	41,9	44,9	48,6
		80	42,9	45,9	49,6
	l/d = 80	10	40	42,2	46,4
		20	40,3	43	47,1
		30	40,8	43,2	48,1
		40	41,6	44,5	48,8
		60	42,1	45,7	49,5
		80	43,9	46,6	50,2

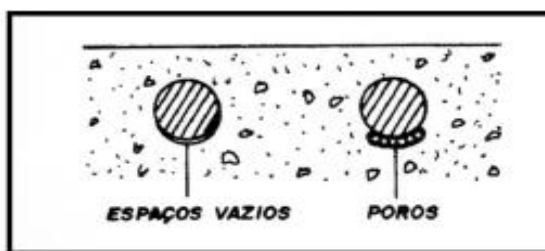
Fonte: YAZICI e AREL (2012)

Analisando os resultados, os autores concluíram que com o aumento da quantidade de fibras e a relação l/d, a tensão de aderência também aumentou, e para todos os teores de fibras o valor da tensão foi maior que o concreto sem o reforço fibroso.

2.4.5 Posição das barras na concretagem

Leonhardt e Mönning (1977) em seus estudos verificaram que a posição da barra, horizontal ou vertical, durante a concretagem é importante para a aderência, assim como sua altura em relação ao fundo da forma. Em virtude da ocorrência da exsudação do concreto ainda fresco, há um acúmulo de água sob as barras, que é mais tarde absorvida pelo concreto, porém facilitando a formação de poros na parte inferior da barra, Figura 2.9.

Figura 2.9 - Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal, devido à exsudação e ao acúmulo de água



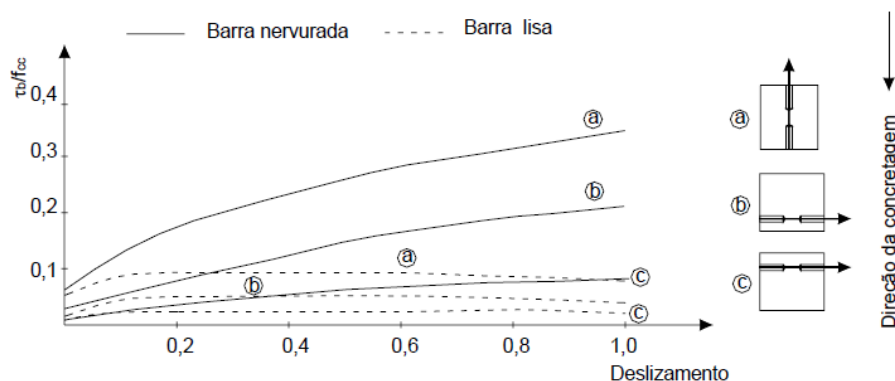
Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1977)

É por essa razão que em barras horizontais a aderência é menor comparada às barras posicionadas na vertical. Na NBR 6118:2014-ABNT, no item 9.3.1 leva em consideração o posicionamento da barra de aço na concretagem, em boa situação quanto à aderência, em uma das seguintes posições:

- a) Com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- b) Horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
 - para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou junta de concretagem mais próxima.

De acordo com Couto (2007), barras de aço que são concretadas na posição vertical e carregadas na direção contrária ao lançamento do concreto apresentam maior resistência de aderência, assim como barras concretadas na horizontal, mas não muito acima da face inferior da peça. Já o contrário, as barras concretadas na vertical e carregadas na direção que foram concretadas e as barras concretadas na horizontal bem acima da face inferior do elemento estrutural têm resistência de aderência menor. Leonhardt e Mönning (1977) mostra essa diferença a partir de resultados de ensaio de arrancamento (Figura 2.10).

Figura 2.10 - Resultados dos ensaios de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem

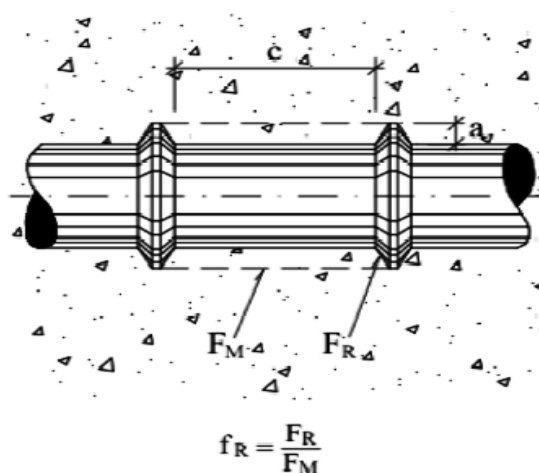


Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1977)

2.4.6 Conformação superficial da barra

As nervuras existentes nas barras de aço contribuem para a parcela da aderência mecânica, já que as nervuras “travam” no concreto. Conforme, Leonhardt e Mönnig, 1977, o valor da resistência de aderência mecânica decorre da forma, da altura, da inclinação das nervuras e da distância entre elas. Os autores definiram, também, outro parâmetro como mostra a imagem abaixo (Figura 2.11) chamado superfície relativa f_R , para comparação de barras de perfis diferentes. Essa relação é dada entre a superfície das nervuras F_R e a superfície lateral F_M , a área cilíndrica entre as nervuras.

Figura 2.11 - Superfície relativa da nervura

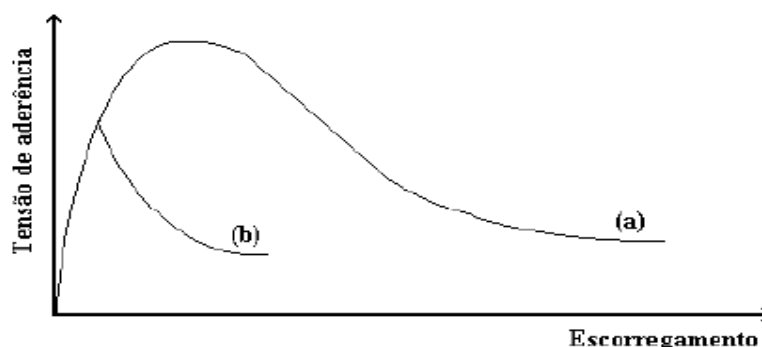


Fonte: LEONHARDT e MONNIG(1977)

2.5 MODOS DE RUPTURA DA ADERÊNCIA

Dois modos de ruptura ligados à perda de aderência se destacam na literatura: a ruptura por arrancamento e a ruptura por fendilhamento. Esses dois tipos de ruptura estão apresentados na Figura 2.12 em forma de gráfico.

Figura 2.12 - Representação gráfica dos modos de ruptura por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)



Fonte: DUMÊT (2003)

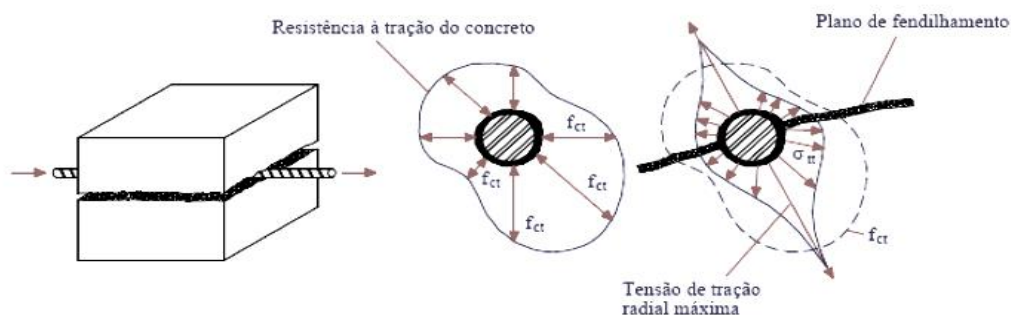
Observa-se no gráfico acima que para elementos semelhantes, o rompimento por arrancamento da barra tem comportamento mais dúctil que por fendilhamento.

Dumêt (2003) descreve que a forma de ruptura que acontecerá numa peça depende de diversos fatores, como as características da barra, o diâmetro, o tipo (barra, fio, cordoalha), a conformação da superfície (lisa ou nervurada), a qualidade do concreto, o espaçamento entre as barras e o cobrimento do concreto.

De acordo com Castro (2002), a ruptura por arrancamento é influenciada principalmente pelo corte do concreto entre as nervuras. Sendo basicamente associado esse tipo de ruptura à resistência do concreto e ao perfil das nervuras (tipo e geometria).

Correia, 2012, explica que a ruptura por fendilhamento acontece em consequência da tração circunferencial gerada pelas componentes diagonais das tensões de compressão transferidas do aço para o concreto. Esse tipo de rompimento acontece quando o confinamento não é bastante para assegurar que a barra seja arrancada completamente. Como a ligação dos materiais mobiliza tensões diagonais de compressão e que originam tensões radiais de tração no entorno da barra, essas tensões de tração criam no concreto uma região microfissurada e sujeita ao fendilhamento paralelo ao eixo da barra de aço, como mostra na Figura 2.13. Essas tensões tangenciais de tração tendem a gerar mais fissuras de fendilhamento que podem chegar às bordas do concreto e até causar perda do cobrimento e da aderência das barras.

Figura 2.13 - Fendilhamento longitudinal do concreto



Fonte: FUSCO (1995)

De modo geral, para impedir esse modo de ruptura por fendilhamento, ao longo das barras ancoradas por aderência podem ser usadas barras transversais (armadura de costura). Esta armadura tem a função de absorver os esforços de tração e impedir que aconteça a ruptura longitudinal por fendilhamento.

O problema do fendilhamento também pode ser evitado por meio da existência de uma compressão transversal ao eixo da barra, já que essas tensões tendem a anular ou diminuir as tensões transversais de tração derivadas do fenômeno de ancoragem (Figura 2.14). Assim como um cintamento helicoidal gera um estado de compressão transversal e, finalmente, uma armadura transversal de costura absorve os esforços de tração.

Figura 2.14 - Armadura para evitar fissuras de fendilhamento na ancoragem reta



Fonte: FUSCO(1995)

Pode-se concluir que a ruptura por arrancamento da barra de aço acontece quando não há suficiente resistência à compressão do concreto. Neste caso, o concreto é cisalhado entre as nervuras da barra de aço. No entanto, ocorrerá o fendilhamento do elemento de concreto, se existir satisfatória resistência à compressão do concreto. Ainda, se houver armadura de confinamento, tem-se a redução do crescimento das fissuras, ocasionando o arrancamento da barra.

Al-Jahdali et al (1994) apud Almeida (2006) classificou quatro modos de ruptura de aderência. O autor tratou de um ensaio de arrancamento de uma barra de aço em um prisma de concreto simples, isto é, sem adição de armadura de confinamento ou de fibras metálicas, somente a barra para verificação de aderência:

- Arrancamento: consiste do escorregamento da barra no prisma de concreto, pois o cobrimento do concreto adjacente à barra de aço promove um confinamento adequado, prevenindo o fendilhamento do modelo, caracterizando, então, uma ruptura dúctil;
- Fendilhamento: consiste da ruptura do prisma no concreto adjacente à barra de aço. Isso ocorre em virtude do aumento das tensões que superam a capacidade resistente da peça, originando fissuração intensa nas direções transversal e longitudinal. Este tipo de ruptura é caracterizado como frágil ou brusca;
- Tração: consiste da formação de fissuras perpendiculares à direção da aplicação da força, localizadas na extremidade da barra de aço envolvida pelo prisma de concreto;
- Ruptura do aço: consiste do escoamento da barra de aço, antes que seja atingida a capacidade resistente da ligação entre o aço e o concreto, ou seja, a aderência entre os dois materiais excedeu o limite de escoamento do aço.

2.6 TIPOS DE ENSAIOS DE ADERÊNCIA

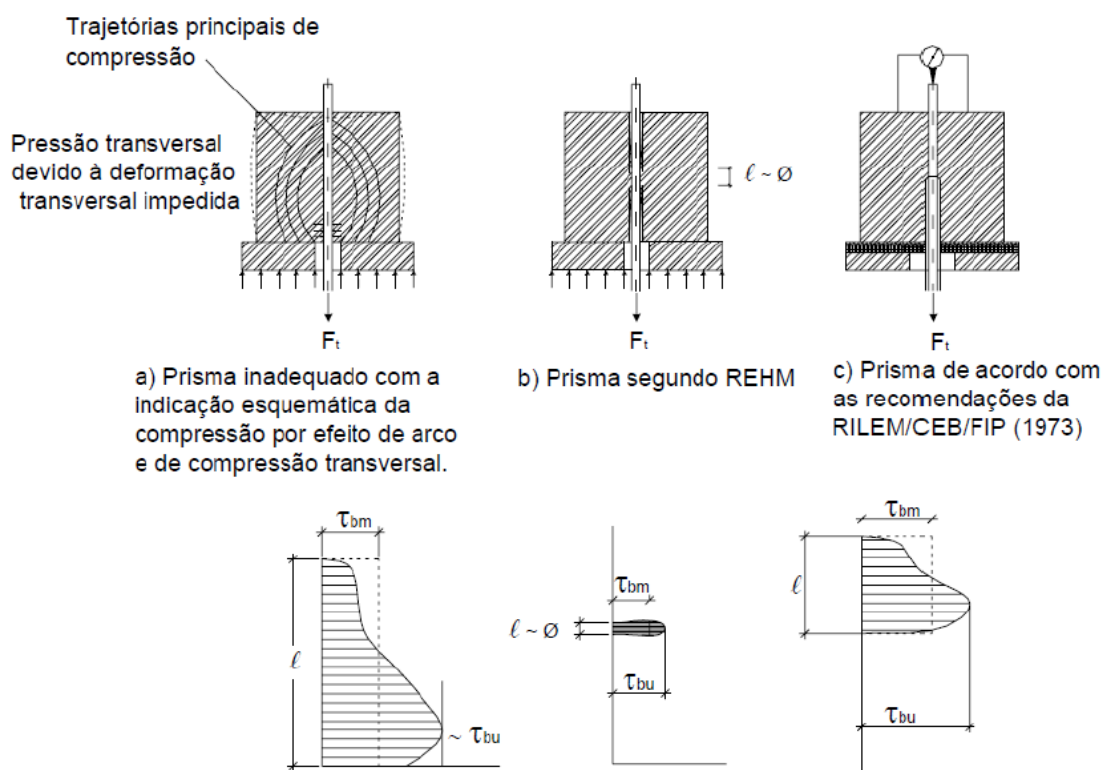
Na literatura técnica existem vários modelos de ensaios de aderência que permitem encontrar a relação (curva) tensão de aderência versus deslizamento e ainda investigar os diversos fatores que afetam o comportamento da aderência, como: diâmetro da barra, resistência à compressão do concreto, presença de fibras, sentido da aplicação do carregamento, além de outras variações. Nos tópicos seguintes estão listados e descritos esses métodos.

2.6.1 Ensaio de arrancamento direto (*pull-out test*)

O ensaio de arrancamento direto é um dos ensaios mais usuais e baseia-se apenas em remover uma barra de aço envolvida num corpo-de-prova de concreto, estando este sobre placas de apoio de uma máquina de ensaio. No corpo-de-prova, a barra tem suas extremidades projetadas para fora, em uma dessas extremidades é aplicada e medida a força de tração e na outra é lido o deslizamento. As dimensões e a forma do corpo-de-prova, bem como a posição e o comprimento de aderência da barra, exerce influência significativa nos resultados do ensaio.

Na Figura 2.15 o corpo-de-prova (a) mostrado é considerado inadequado, pois a placa de apoio impede a deformação transversal e através da compressão por efeito de arco, cria uma compressão transversal sobre a barra, causando uma aderência por atrito adicional. Por meio de trechos sem aderência, nos corpos-de-prova (b) e (c) essas influências são amenizadas (LENHODART e MONNIG, 1977).

Figura 2.15 - Corpos-de-prova para o ensaio de arrancamento e as respectivas variações da tensão ao longo do comprimento de aderência

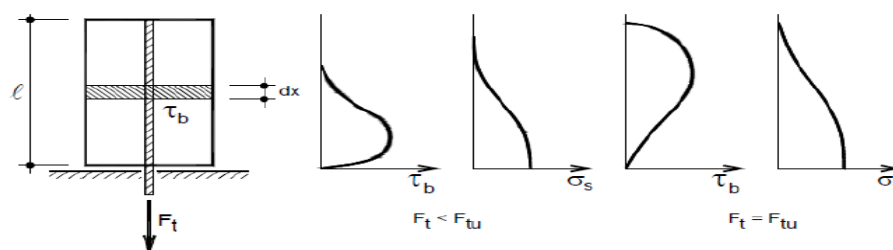


Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1977)

A respeito da capacidade de ancoragem das barras, no ensaio de arrancamento ainda é questionada, devido às desigualdades entre o quadro de tensões gerados neste tipo de ensaio e aquele correspondente às regiões de ancoragem das armaduras das peças de concreto armado. No ensaio de arrancamento, basicamente há uma compressão longitudinal do concreto. Essa compressão longitudinal não aparece na zona de ancoragem da armadura de tração de vigas submetidas à flexão, Fusco (1995).

Teoricamente, o comportamento de aderência num ensaio de arrancamento é mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 - Comportamento da tensão de aderência

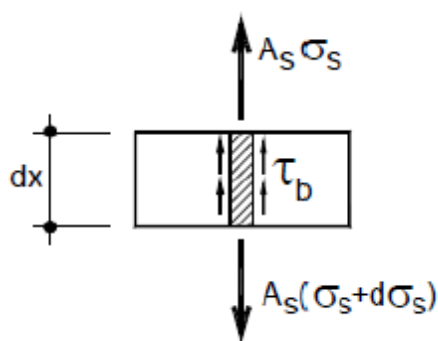


Fonte: FUSCO (1995)

Com a aplicação da força de tração F_t , aparece na barra a tensão σ_s e tensões de aderência τ_b , em que F_t é transferida progressivamente ao concreto. Por isso à medida que se afasta do ponto de entrada da barra de aço no prisma de concreto a tensão σ_s diminui.

Caso se tenha que a força de tração F_t menor que a força de tração última F_{tu} , a aderência será mobilizada em apenas uma parte do comprimento total. Quando ocorrer o arrancamento, em que $F_t = F_{tu}$, será provocada a máxima capacidade de aderência entre os dois materiais. A tensão de aderência máxima é dada no ponto de inflexão do diagrama de σ_s .

A partir de um elemento infinitesimal de comprimento dx , Figura 2.17, a tensão de aderência entre uma barra e o concreto pode ser determinada analiticamente, considerando o equilíbrio das forças que atuam no elemento dx .

Figura 2.17 - Elemento infinitesimal dx 

Fonte: FUSCO (1995)

Por equilíbrio:

$$A_s \times \sigma_s + \tau_b \times \pi \times \varnothing \times dx = A_s \times \sigma_s + A_s \times d\sigma_s$$

Resultando em:

$$\tau_b = \frac{A_s}{\pi \times \varnothing} \times \frac{d\sigma_s}{dx}$$

Logo

$$\tau_b = \frac{\varnothing}{4} \times \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (2.01)$$

Onde:

A_s – seção transversal do aço

σ_s - tensão de tração no aço;

τ_b – tensão de aderência.

Há uma série de dificuldades em medir a variação de tensão de aderência τ_b ao longo do comprimento de aderência l_b . Sendo assim, os resultados dos ensaios de arrancamento são dados através de valores médios:

$$\tau_{bm} = \frac{F_t}{\pi \times \varnothing \times l_b} \quad (2.02)$$

Sendo:

F_t = força atuante na barra;

\varnothing = o diâmetro da barra;

l_b = o comprimento de ancoragem.

Leonhardt e Mönnig (1977) definiram, como valor de cálculo da resistência de aderência F_{tR} , a tensão de aderência para a qual ocorre um deslocamento da extremidade livre da barra de 0,1 mm. Para a força F_t correspondente ($\delta = 0,1$), tem-se:

$$F_{tR} = \frac{F_t}{\pi \times \varnothing \times l_b} \quad (2.03)$$

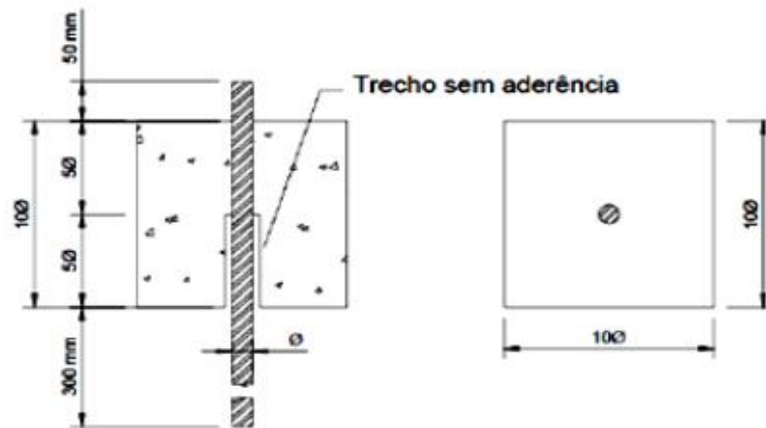
No entanto, a resistência de aderência efetiva (tensão última de aderência τ_{bu}), principalmente para barras nervuradas, chega a valor muito maior que o de cálculo, alcançando até o dobro desse valor e o deslizamento podendo atingir valores de 1 mm. Devido a grande dispersão dos valores de resistência de aderência, aconselha-se um valor bastante afastado da aderência efetiva (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977). Segundo Silva et al. (2014), apesar do tipo *pull-out* não reproduzir os efeitos dos esforços de flexão na aderência aço-concreto, levando a restrições quando se deseja determinar a resistência de aderência efetiva de elementos estruturais, o mesmo se mostra atraente para fins de controle tecnológico do concreto, pois o *pull-out* é eficaz em comparar concretos com resistências distintas em relação à resistência de aderência aço-

concreto. A normalização do ensaio de arrancamento pode ser vista em alguns códigos normativos detalhados, como os apresentados pela RILEM RC6 (1983) e também American Society for Testing and Materials ASTM C-234 (1991) que serão mostrados a seguir.

2.6.2 Ensaio de arrancamento RILEM RC6 (1983)

O ensaio de arrancamento mais conhecido é o apontado pela RILEM RC6 (1983), como descrito anteriormente. Neste ensaio, as duas extremidades da barra ficam fora do prisma de concreto, em um dos extremos a barra é tracionada e, no outro extremo, medidos os deslocamentos relativos entre aço e concreto, como mostra a Figura 2.18.

Figura 2.18 - Prisma para ensaio de arrancamento



Fonte: RILEM RC6 (1983)

O corpo-de-prova deve ser concretado com a barra na posição horizontal, a compactação feita com um vibrador de imersão e deve-se esperar três dias para o prisma ser desmoldado.

A velocidade de aplicação da força é dada de acordo com a seguinte expressão:

$$v_b = 5 \times \varnothing^2 \quad (2.04)$$

Onde:

v_b = velocidade de aplicação da carga (kgf/s)

\varnothing = diâmetro da barra (cm)

A tensão de aderência deste ensaio é encontrada a partir da relação de resistência à compressão média do concreto, pela seguinte expressão:

$$\tau_b = \frac{1}{5\pi} \times \frac{F}{d_s^2} \times \frac{f_{cm}}{f_c} \quad (2.05)$$

Onde:

τ_b = tensão de aderência (MPa);

F = força de tração (kN);

d_s = diâmetro da barra (mm);

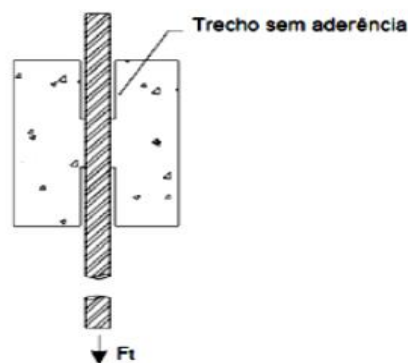
f_{cm} = resistência média do concreto de referência de 30 ou 25,5 (MPa);

f_c = resistência média dos corpos-de-prova de concreto ensaiados (MPa).

2.6.3 Ensaio de arrancamento RHEM (1979)

Este ensaio de arrancamento consiste num prisma de concreto cúbico, com uma barra centrada, tendo dois trechos sem aderência nas duas extremidades do prisma (Figura 2.19). O trecho com aderência tem comprimento igual a uma vez o diâmetro da barra.

Figura 2.19 - Prisma para ensaio de arrancamento



Fonte: RHEM (1979)

2.6.4 Ensaio de arrancamento ASTM C-234 (1991)

Segundo a ASTM C-234, há dois modelos de corpos-de-prova para a realização do referido ensaio. O primeiro tipo de exemplar tem a forma de um prisma com arestas medindo 150

mm (cubo) e com uma barra de aço posicionada verticalmente ao longo do eixo, destacando que, neste primeiro modelo de ensaio, a concretagem deve ser feita na direção da barra, como ilustrado na Figura 2.20.

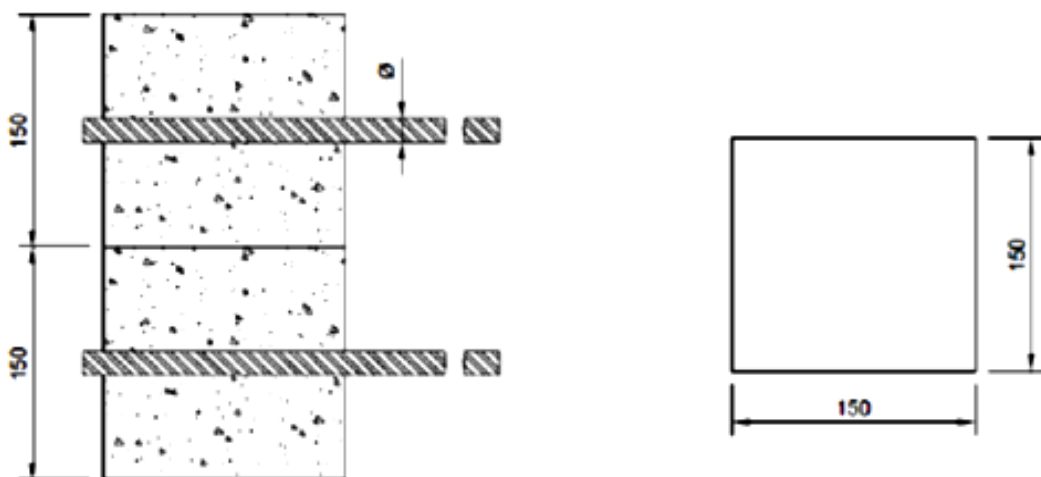
Figura 2.20 - Prisma para ensaio de arrancamento com barra vertical



Fonte: ASTM C-234 (1991)

O segundo modelo de ensaio é um prisma de 150 mm x 150 mm x 300 mm, com o eixo maior na direção vertical. Duas barras de aço, neste caso, são utilizadas, uma posicionada na parte superior do prisma, com uma distância de 75 mm do topo, e a outra barra posicionada na parte inferior, distante 75 mm da base do corpo-de-prova, Figura 2.21.

Figura 2.21 - Prisma para ensaio de arrancamento com barras horizontais



Fonte: ASTM C-234 (1991)

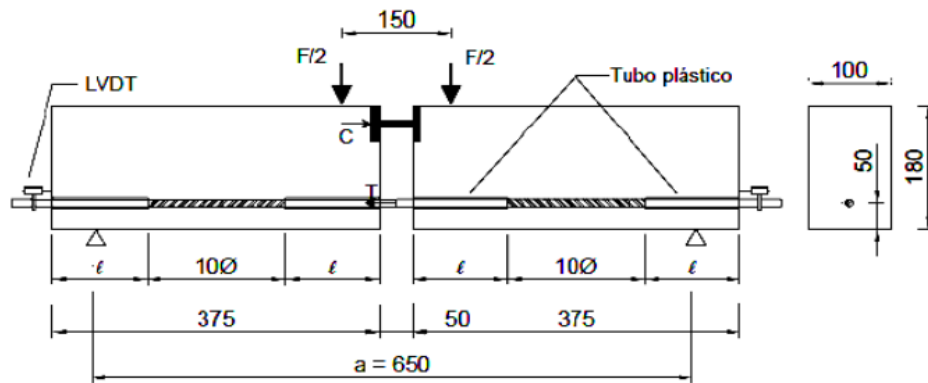
O comprimento dessas duas barras também precisa ser suficiente para que suas extremidades fiquem para fora do corpo de concreto, transponham os dispositivos de ensaio e sejam ancoradas nas garras da máquina de ensaio.

Na metade do prisma, no encontro de cada uma das faces opostas, é feita uma ranhura com profundidade de no mínimo 13 mm, com o intuito de facilitar o rompimento do prisma em duas partes, no plano de enfraquecimento entre as ranhuras, durante a execução do ensaio. Neste segundo modelo, a concretagem é realizada na direção perpendicular aos eixos das barras. A velocidade de aplicação da força nas duas barras nestes ensaios não deve ser superior a 20 kN/min ou deve ser feito o controle de deslocamento em 1,3 mm/min.

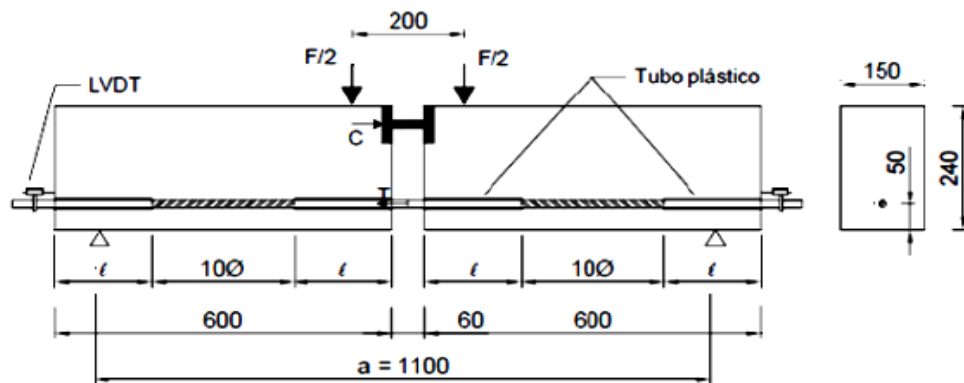
2.6.5 Ensaio de flexão (*beam test*)

Em condições reais, os ensaios de arrancamento simples são de fácil realização, porém não representam fielmente o campo de tensões atuantes como na realidade, a exemplo das zonas de ancoragem das armaduras de tração das vigas em flexão. Logo, o método mais eficiente de se verificar a capacidade de ancoragem de barras em vigas fletidas é através do ensaio de viga (*beam test*). É um ensaio difícil para execução, devido à complexidade de sua montagem e o tamanho dos elementos envolvidos. O *beam test* pode admitir diferentes variáveis, a exemplo: resistência à compressão (entre 30 e 100 MPa), comprimento de ancoragem, tipo de carregamento (monotônico ou cíclico), diâmetro da barra, variação do cobrimento, presença ou não de fibras e a presença ou não de armadura de confinamento.

As Figuras 2.22 e 2.23 mostram as principais características deste ensaio, para barras de diâmetros diferentes.

Figura 2.22 - Modelo de viga padronizado para $\varnothing < 16 \text{ mm}$ 

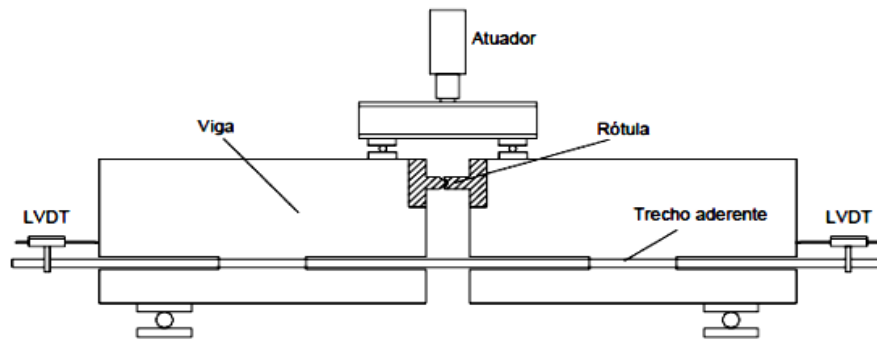
Fonte: RILEM RC5 (1982)

Figura 2.23 - Modelo de viga padronizado para $\varnothing \geq 16 \text{ mm}$ 

Fonte: RILEM RC5 (1982)

O corpo-de-prova consiste em dois blocos paralelepípedicos de concreto armado, ligados na parte inferior por uma barra de aço proposta para o estudo da aderência e, na parte superior, um perfil metálico tipo “I” agindo como rótula para aplicação do carregamento. Duas forças iguais e simétricas são aplicadas nos prismas através do perfil metálico (Figura 2.24) e nas extremidades livres da barra são medidos os deslocamentos.

Figura 2.24 - Instrumentação do modelo de viga



Fonte: ALMEIDA (2006)

As equações seguintes, 2.06 e 2.07, são empregadas, segundo a norma, no cálculo das tensões desenvolvidas nas barras, segundo a força F (N) aplicada na viga.

$$\sigma_s = \frac{1,25 \cdot F}{A_s} \text{ para modelos de viga com } 10 < \varnothing < 16 \text{ m} \quad (2.06)$$

$$\sigma_s = \frac{1,50 \cdot F}{A_s} \text{ para modelos de viga com } 16 \leq \varnothing < 32 \text{ mm} \quad (2.07)$$

Com:

F = força aplicada (N);

A_s = área de seção da barra (mm^2).

E a tensão média de aderência obtida pela equação 2.08 a seguir.

$$\tau_b = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_b} \cdot \frac{\sigma_s \cdot \pi \cdot \varnothing^2}{4 \cdot \pi \cdot \varnothing^2 \cdot 10} = \frac{\sigma_s}{40} \quad (2.08)$$

Sendo:

τ_b = tensão de aderência (MPa);

σ_s = tensão de tração na armadura (MPa);

\varnothing = diâmetro da barra (mm);

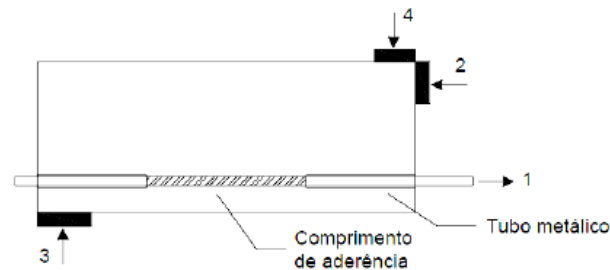
l_b = comprimento de ancoragem, igual a $10\varnothing$ (mm).

2.6.6 Ensaio de extremo de viga (*beam end test*)

Esse ensaio pode ser uma alternativa do ensaio de viga (*beam test*) que consiste de uma barra tracionada na parte inferior de uma viga. A zona de compressão da viga é simulada pela

reação aplicada na parte superior, o momento então criado é equilibrado por um par de forças perpendiculares ao corpo de prova, que simulam a reação de apoio e a força cortante que será transferido pelo concreto (Figura 2.25).

Figura 2.25 - Ensaio de extremidade de viga



Fonte: BARBOSA (2001)

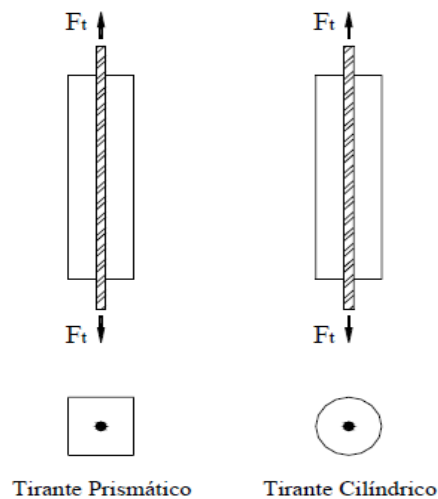
Sendo:

- (1) Força de tração na barra;
- (2) Placa de reação que simula a zona de compressão de viga;
- (3) Placa de reação de apoio;
- (4) Placa que simula o esforço cortante que seria transmitido através do concreto.

2.6.7 Ensaio de tração direta (tirante)

Ensaio de tração direta, também chamado de ensaio de tirante, consiste em aplicar, nas duas extremidades de uma barra envolvida por concreto, de forma cilíndrica ou prismática, duas forças opostas de tração, como ilustrado na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Modelos de tirantes



Fonte: CASTRO (2002)

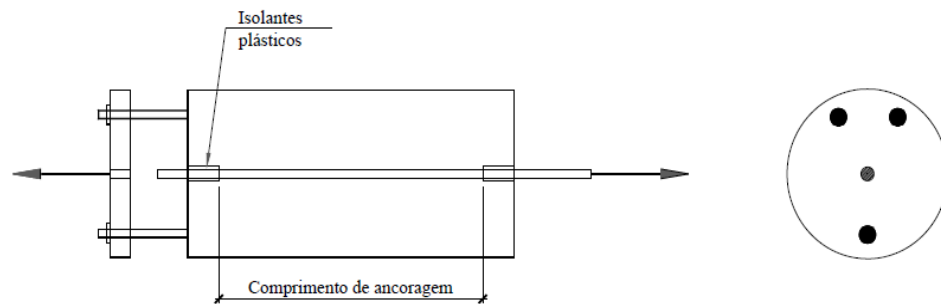
Esse tipo de ensaio apresenta um grande problema que é o aparecimento de fissuras que não se desenvolvem linear nem perpendicularmente à linha média do tirante, bem como não apresentam abertura regular (CASTRO, 2002).

2.6.8 Ensaio das quatro barras

Com o objetivo de eliminar as intervenções das tensões de compressão impostas ao concreto nos ensaios de arrancamento, surgiram diversas modificações nesse ensaio por alguns pesquisadores. Fusco (1995) menciona ensaios desenvolvidos na Escola Politécnica da USP para estudo da ancoragem em condições de emenda.

Como mostrado na Figura 2.27, o ensaio consiste em uma barra central, colocada num corpo-de-prova cilíndrico de concreto, que é tracionada em uma extremidade. Enquanto na outra encontram-se três barras perimetrais, as quais mantêm o concreto imóvel através da força reativa exercidas pelas barras perimetrais.

Figura 2.27 - Esquema geral de ensaio desenvolvido na USP



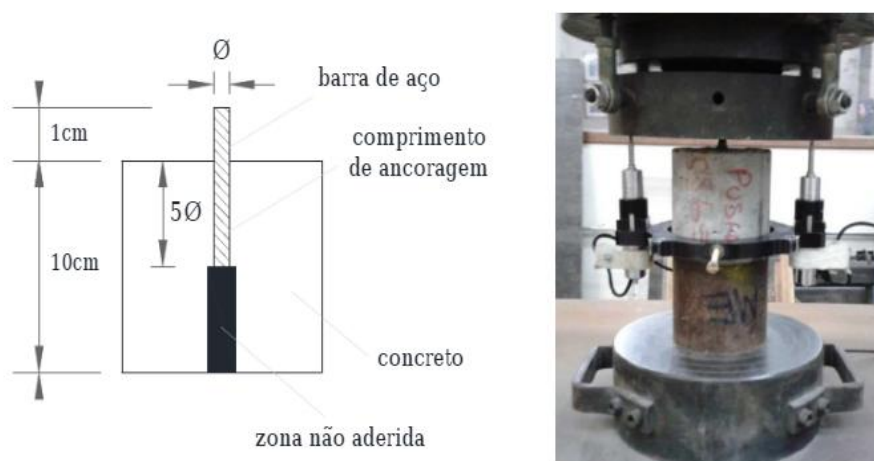
Fonte: FUSCO (1995)

2.6.9 Ensaio de empuxamento (*push-out*)

Bosco et al. (2012) produziram um trabalho para comparar o comportamento da aderência aço-concreto entre ensaio do tipo *pull-out* (arrancamento) e *push out*. Os dois tipos de ensaios se distinguem pela forma como a carga é aplicada na barra. No *pull-out* a barra é arrancada por tração e no *push-out* a barra é empurrada contra o concreto do corpo-de-prova. A Figura 2.28 abaixo mostra as dimensões do corpo-de-prova para o ensaio de *pull-out* e o método de ensaio. E a Figura 2.29 o detalhe e o método para o ensaio de *push-out*.

Figura 2.28 - Detalhe do corpos de prova *pull-out* e método de ensaio

Fonte: BOSCO et al. (2012)

Figura 2.29 - Detalhe do corpos de prova *pull-out* e método de ensaio

Fonte: BOSCO et al. (2012)

A tensão de aderência foi dada pela relação entre a intensidade da força do ensaio dividida pela área de ancoragem da barra, Equação (2.09).

$$\tau_b = \frac{F_t}{\pi \times \varnothing \times l_b} \quad (2.09)$$

Os resultados obtidos da tensão máxima de aderência para os dois ensaios estão expostos na Tabela 2.5 a seguir, os corpos de prova foram ensaiados com idades diferentes de cura (7 e 28 dias).

Tabela 2.5 - Resultados ensaio de aderência (*pull-out* e *push-out*)

Corpo de prova	Pull-out		Push-out	
	τ_{bm7} (MPa) 7 dias	τ_{bm28} (MPa) 28 dias	τ_{bm7} (MPa) 7 dias	τ_{bm28} (MPa) 28 dias
CP 1	25,6	29,9	20,7	27,6
CP 2	21,9	29,4	23,9	32,1
CP 3	22,9	31,6	24,3	32,0
Média ± D.P.	23,5 ± 1,9	30,3 ± 1,1	23,0 ± 2,0	30,6 ± 2,5

Fonte: BOSCO et al (2012)

De acordo com os valores alcançados, os autores concluíram que os dois métodos para estudo da aderência aço-concreto, *pull-out* e *push-out*, geram resultados próximos de tensão última de aderência.

2.7 PRESCRIÇÃO NORMATIVA SEGUNDO ABNT NBR 6118:2014

O valor da resistência de aderência entre armadura e concreto na ancoragem de armaduras passivas segundo a NBR 6118:2014, é obtida pelas expressões a seguir, que depende da resistência do concreto, da rugosidade superficial da barra, da posição da barra na massa de concreto (situação de aderência) e do diâmetro da barra:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd}$$

Onde:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$$

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas

$\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas

$\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência

$\eta_3 = 1,0$ para < 32 mm;

$\eta_3 = (132 - \emptyset) / 100$, para $\emptyset \geq 32$ mm;

Onde:

\emptyset é o diâmetro da barra, em milímetros;

f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração direta.

A resistência à tração direta do concreto f_{ct} , na falta de ensaios para sua determinação pode ser considerada a partir das expressões abaixo, para concretos de resistência à compressão até 50 MPa:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ (MPa)}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \text{ (MPa)}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ct,m} \text{ (MPa)}$$

Sendo:

$f_{ct,m}$ - resistência média à tração do concreto;

$f_{ctk,inf}$ - resistência característica do concreto à tração na flexão;

$f_{ctk,sup}$ - resistência característica à tração indireta;

γ_c - coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Os valores γ_c valem:

$\gamma_c = 1,4$ para combinações normais

$\gamma_c = 1,20$ para combinações especiais ou de construção

$\gamma_c = 1,20$ para combinações excepcionais

Ainda é definido segundo a norma brasileira um comprimento de ancoragem básico necessário para que a armadura passiva transfira as tensões para o concreto, admitindo, ao longo desse comprimento a resistência de aderência uniforme e igual a f_{bd} .

O comprimento de ancoragem básico é dado por:

$$l_b = \frac{\emptyset \cdot f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}}$$

Onde:

f_{yd} - tensão de escoamento de cálculo da armadura passiva;

f_{bd} - resistência de aderência de cálculo.

3 MODELOS TEÓRICOS

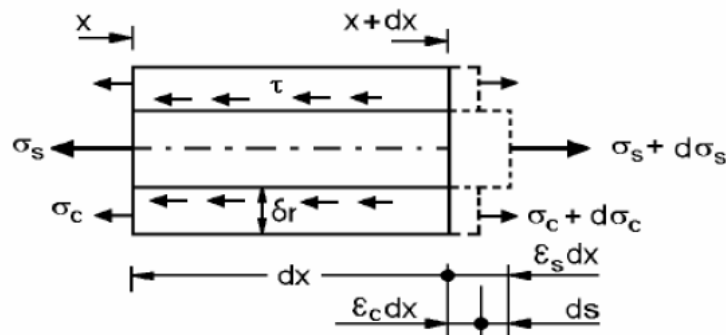
Este capítulo traz alguns modelos teóricos encontrados na literatura técnica para a curva tensão de aderência x deslizamento e para a tensão máxima de aderência. Os modelos sugeridos por Barbosa (2001) e de Almeida Filho (2006), válidos para concretos de resistência comum de 30 MPa como para os concretos de maior desempenho de 60 MPa. Há também o modelo de Haraji et al. (1995) para concretos com fibras e classe de resistência de 30 e 60 MPa.

3.1 EQUAÇÃO DIFERENCIAL DA ADERÊNCIA

O princípio básico do concreto armado é que o aço resista à tração enquanto o concreto resiste à compressão. Para isso, é necessário que haja uma transferência de esforços de um para o outro, o que é possível devido à aderência. Nas peças de concreto armado, as armaduras sofrem variação de tensão ao longo do comprimento, especialmente nas zonas de ancoragem e de variação do momento fletor (TOJAL, 2011).

Para que num elemento de concreto armado se mantenha em equilíbrio e a armadura não escorregue, aparecem tensões de aderência, Figura 3.1. Por equilíbrio das forças horizontais pode-se deduzir uma Equação Diferencial do fenômeno de aderência, considerando um elemento de comprimento infinitesimal dx .

Figura 3.1 - Aderência aço-concreto



Fonte: SIMPLÍCIO (2008)

$$(\sigma_c + d\sigma_c)A_c + (d\sigma_s + \sigma_s)A_s = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s + \tau \cdot dx \cdot \pi \cdot \emptyset \quad (3.01)$$

$$d\sigma_c A_c + d\sigma_s A_s = \tau \cdot dx \cdot \pi \cdot \emptyset \quad (3.02)$$

$$\tau = \frac{A_s \cdot d\sigma_s}{\emptyset \cdot \pi \cdot dx} \quad (3.03)$$

Na equação 3.03 substituindo o valor da seção do aço (A_s) e desprezando a contribuição do concreto tracionado, pode-se reescrever:

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{4 \cdot \tau}{\emptyset} \quad (3.04)$$

O deslizamento $s(x)$ será a diferença entre os deslizamentos do aço e do concreto:

$$s_x = s_s - s_c \quad (3.05)$$

No entanto, a derivada dos deslizamentos em relação a x é a deformação específica, logo:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \epsilon_s - \epsilon_c \quad (3.06)$$

Onde, ϵ_c e ϵ_s são as deformações no concreto e no aço, respectivamente.

De acordo com a Lei de Hook no regime elástico, pode-se escrever:

$$d\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_c \quad (3.07)$$

$$d\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \quad (3.08)$$

Sendo assim:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (3.09)$$

Em que E_c e E_s são os módulos de elasticidade do concreto e do aço.

Derivando a equação 3.09 em relação a x tem-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d\sigma_s}{E_s dx} - \frac{d\sigma_c}{E_c dx} \quad (3.10)$$

Substituindo a equação 3.04 na 3.10 obtemos:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{4\tau}{Es\emptyset} = - \frac{d\varepsilon_c}{Ecdx} \quad (3.11)$$

A equação diferencial 3.11 pode ser solucionada com condições de contorno adequadas e com leis constitutivas para o aço e o concreto. Necessita ainda de uma função $\tau(x)$, que relacione tensão de aderência e deslizamentos.

3.2 MODELO DE BARBOSA (2001)

Barbosa (2001), usando ensaios de arrancamento do tipo *pull-out* e por avaliação estatística para concretos de resistência convencionais e de alta resistência, variando os diâmetros das barras de aço, chegou às expressões abaixo para a curva tensão de aderência versus deslizamento para o seu modelo:

- Para concretos convencionais ($f_c \leq 50$ MPa)

$$\tau = 19,36. \delta^{0,51} \quad (3.12)$$

$$\text{Sendo } \delta_{max} = 0,25.\emptyset^{0,68} \quad (3.13)$$

- Para concretos de alto desempenho ($f_c > 50$ MPa)

$$\tau = 32,58. \delta^{0,48} \quad (3.14)$$

$$\text{Sendo } \delta_{max} = 0,52.\emptyset^{0,42} \quad (3.15)$$

Onde:

τ - tensão de aderência (MPa);

δ - deslizamento (mm);

\emptyset - diâmetro da barra (mm);

f_c - resistência à compressão do concreto (MPa).

3.3 MODELO DE ALMEIDA (2006)

Em sua pesquisa, o autor estudou concretos de resistência de 30 MPa, convencionais e autoadensáveis e concretos de alta resistência de 60 MPa (CAD). Na sua análise estatística dos resultados de ensaio arrancamento e de viga, para barras de aço de 10 e 16 mm de diâmetro, apresentou os seguintes modelos para a tensão de aderência.

- Ensaio de arrancamento

Concreto convencional:

$$\tau(\delta) = 11,522 - 10,138.e^{\frac{-\delta}{0,2552}} \quad \text{para } \varnothing = 10 \text{ mm} \quad (3.16)$$

$$\tau(\delta) = 10,583 - 9,165.e^{\frac{-\delta}{0,3597}} \quad \text{para } \varnothing = 16 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Concreto de alto desempenho:

$$\tau(\delta) = 15,73 - 15,79.e^{\frac{-\delta}{0,602}} \quad \text{para } \varnothing = 10 \text{ mm} \quad (3.18)$$

$$\tau(\delta) = 21,31 - 24,23.e^{\frac{-\delta}{0,956}} \quad \text{para } \varnothing = 16 \text{ mm} \quad (3.19)$$

- Ensaio de viga

Concreto convencional:

$$\tau(\delta) = 13,334 - 11,322.e^{\frac{-\delta}{0,0914}} \quad \text{para } \varnothing = 10 \text{ mm} \quad (3.20)$$

$$\tau(\delta) = 10,583 - 9,165.e^{\frac{-\delta}{0,0323}} \quad \text{para } \varnothing = 16 \text{ mm} \quad (3.21)$$

Concreto de alto desempenho:

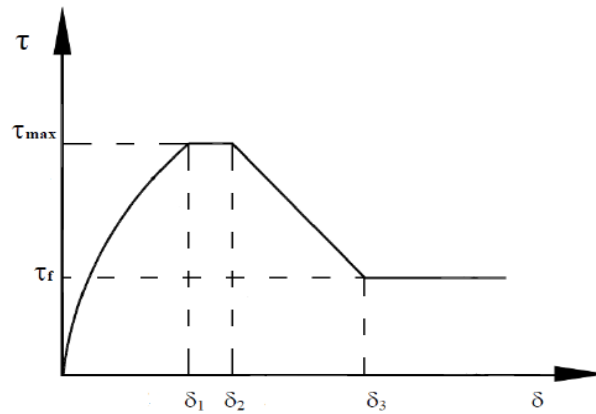
$$\tau(\delta) = 17,192 - 14,572.e^{\frac{-\delta}{0,0086}} \quad \text{para } \varnothing = 10 \text{ mm} \quad (3.22)$$

$$\tau(\delta) = 16,923 - 13,062.e^{\frac{-\delta}{0,0205}} \quad \text{para } \varnothing = 16 \text{ mm} \quad (3.23)$$

3.4 MODELO DE HARAJLI ET AL. (1995)

O modelo de Harajli et al. (1995) se baseia nos trabalhos de Eligehausen et al. (1983), elaborado para concretos com adição de fibras e para concretos tanto convencionais como de resistência elevada. A curva para ruptura por arrancamento (Figura 3.2) para este modelo é mostrada a seguir e é dividida em quatro estágios.

Figura 3.2 - Relação tensão de aderência versus deslizamento



Fonte: HARAJLI et al. 1995)

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{\delta}{\delta_1} \right)^a \quad \text{para } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad (3.24)$$

$$\tau = \tau_{max} \quad \text{para } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \quad (3.25)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \frac{(\delta - \delta_2)}{(\delta_3 - \delta_2)} \quad \text{para } \delta_2 \leq \delta \leq \delta_3 \quad (3.26)$$

$$\tau = \tau_f \quad \text{para } \delta_3 < \delta \quad (3.27)$$

De acordo com seus resultados experimentais, Harajli et al. (1995) mostraram que os parâmetros ideais para se chegar as curvas das expressões acima, para barras de diâmetro de 8 mm a 25 mm são:

$$a = 0,30$$

$$\tau_{max} = 2,5\sqrt{f_c}$$

$$\tau_f = 0,9\sqrt{f_c}$$

$$\delta_1 = 0,75\delta_{max} = 0,15s_r$$

$$\delta_2 = 1,75\delta_{max} = 0,35s_r$$

$$\delta_3 = s_r$$

O valor do deslizamento máximo (δ_{max}) pode ser obtido pelo cálculo seguinte, a partir da distância entre as nervuras:

$$\delta_{max} = 0,189.s_r + 0,18 \quad (\text{mm}) \quad (3.28)$$

Ou simplesmente:

$$\delta_{max} = \frac{s_r}{5} \quad (3.29)$$

3.5 MODELO CEB-FIP (1990)

Modelo baseado no trabalho de Eligehausen et al (1983), obtido por análise experimental de corpos de prova de resistência normal. Apresenta expressões em que as tensões de aderência são calculadas a partir do deslizamento relativo δ , como mostradas abaixo e graficamente representadas pela Figura 3.3:

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{\delta}{\delta_1} \right)^a \quad \text{para } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad (3.30)$$

$$\tau = \tau_{max} \quad \text{para } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \quad (3.31)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \frac{(\delta - \delta_2)}{(\delta_3 - \delta_2)} \quad \text{para } \delta_2 \leq \delta \leq \delta_3 \quad (3.32)$$

$$\tau = \tau_f \quad \text{para } \delta_3 > \delta \quad (3.33)$$

Sendo:

τ – tensão de aderência para um dado deslocamento δ (MPa);

τ_{max} - tensão máxima de aderência (MPa);

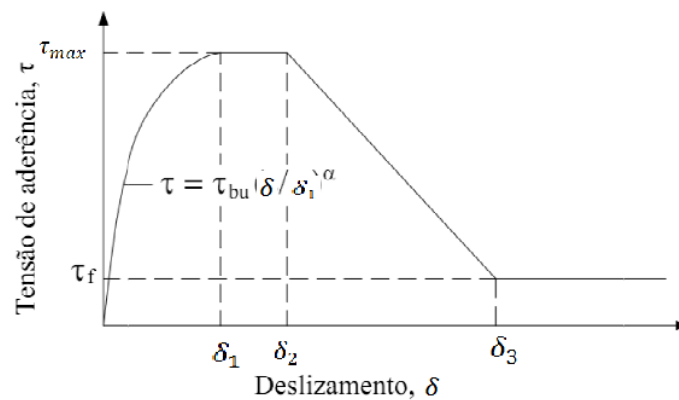
τ_f - valor final da tensão de aderência (MPa);

δ_1 - deslocamento referente à tensão máxima (mm);

δ_2 - deslocamento referente ao ponto de início do trecho descendente (mm);

δ_3 - deslocamento referente à tensão final (mm).

Figura 3.3- Tensão de aderência x deslizamento



Fonte: CEB/FIP (1990)

Os parâmetros usados nas expressões acima para o cálculo da tensão de aderência variam de acordo com as condições de aderência, a condição de confinamento do concreto e o tipo de ruptura, para barras com rugosidade superficial estão na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Parâmetros da curva de aderência x deslizamento para barras rugosas

	Concreto sem confinamento		Concreto com confinamento	
	Zona de boa aderência	Zona de má aderência	Zona de boa aderência	Zona de má aderência
δ_1 (mm)	0,6	0,6	1,0	1,0
δ_2 (mm)	0,6	0,6	3,0	3,0
δ_3 (mm)	1	2,5	Espaçamento entre nervuras	
a	0,4	0,4	0,4	0,4
τ_{max} (MPa)	$2.f_c^{1/2}$	$f_c^{1/2}$	$2,5.f_c^{1/2}$	$1,5.f_c^{1/2}$
τ_f (MPa)	$0,15.\tau_{max}$	$0,15.\tau_{max}$	$0,4.\tau_{max}$	$0,4.\tau_{max}$

Fonte: CEB-FIP (1990)

Os valores da segunda e terceira coluna são válidos para o cobrimento de concreto $c = \emptyset$ e a armadura transversal A_{st} maior que o valor mínimo dado por:

$$A_{st,min} = 0,25 \cdot n \cdot A_s \quad (3.34)$$

Onde:

A_{st} = área de estribos no comprimento de ancoragem;

n = número de barras envolvidas pelos estribos;

A_s = área de uma barra.

As quarta e quinta colunas são aplicáveis em concreto confinando, em que:

- $c \geq 5\emptyset$;
- espaçamento entre barras $\geq 10\emptyset$;
- armadura transversal regularmente espaçada com uma área, com $A_{st} > n.A_s$;
- grande pressão lateral superior a 7,5 MPa.

Para situações de $A_{st,min} < A_{st} < A_s$ ou $0 < P < 7,5$ MPa, os valores das equações do modelo podem ser interpolados linearmente entre os parâmetros de concreto confinado e não confinado.

A Tabela 3.2 seguinte mostra os parâmetros válidos para a definição da curva tensão de aderência x deslizamento para barras lisas, tanto para concreto confinado quanto para não confinado.

Tabela 3.2 - Parâmetros da curva tensão de aderência x deslizamento para barras lisas

	Aço trefilado a frio		Aço laminado a quente	
	Condições de aderência		Condições de aderência	
	Boas	Demais casos	Boas	Demais casos
$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ (mm)	0,01	0,01	0,1	0,1
a	0,5	0,5	0,5	0,5
$\tau_{max} = \tau_f$ (MPa)	$0,1.f_c^{1/2}$	$0,05.f_c^{1/2}$	$0,3.f_c^{1/2}$	$0,15.f_c^{1/2}$

Fonte: CEB-FIP (1990)

3.6 MODELO DE HUANG ET AL (1996)

Huang et al (1996) apresentaram um modelo simplificado para a curva tensão de aderência versus deslizamento, baseado também nos conceitos do trabalho de Eligehausen et al (1983). Os autores propuseram alterações nos parâmetros do modelo proposto pelo CEB-FIP (1990), Tabela 3.3, e é aplicável a barras nervuradas em concreto confinado, de alta resistência ou resistência convencional.

Tabela 3.3 - Parâmetros da curva tensão de aderência x deslizamento

	Concreto convencional		Concreto de alta resistência	
	Zona de boa aderência	Zona de má aderência	Zona de boa aderência	Zona de má aderência
δ_1 (mm)	1,0	1,0	0,5	0,5
δ_2 (mm)	3,0	3,0	1,5	1,5
δ_3 (mm)	Espaçamento entre nervuras		Espaçamento entre nervuras	
δ_4 (mm)	$3.s_r$	$3.s_r$	$3.s_r$	$3.s_r$
a	0,4	0,4	0,3	0,3
τ_{max} (MPa)	$0,45.f_{cm}$	$0,225.f_{cm}$	$0,45.f_{cm}$	$0,225.f_{cm}$
τ_f (MPa)	$0,4.\tau_{max}$	$0,4.\tau_{max}$	$0,4.\tau_{max}$	$0,4.\tau_{max}$

s_r = é o espaçamento entre as nervuras

Fonte: HUANG et al (1996)

A curva tensão de aderência *versus* deslizamento é delineada de acordo com as equações a seguir:

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{\delta}{\delta_1} \right)^a \quad \text{para } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad (3.35)$$

$$\tau = \tau_{max} \quad \text{para } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \quad (3.36)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \frac{(\delta - \delta_2)}{(\delta_3 - \delta_2)} \quad \text{para } \delta_2 \leq \delta \leq \delta_3 \quad (3.37)$$

$$\tau = \tau_f - \tau_f \cdot \frac{(\delta - \delta_3)}{(\delta_4 - \delta_3)} \quad \text{para } \delta_3 \leq \delta \leq \delta_4 \quad (3.38)$$

4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Neste capítulo é apresentada a definição e características de materiais compósitos formados por uma matriz cimentícia e um reforço. Como nesse trabalho o reforço na matriz será a fibra metálica de aço no concreto, este capítulo trata também do concreto reforçado com fibras (CRF) e especificamente o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

4.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

De acordo com Bentur e Mindess (1990), o primeiro compósito foi constituído de cimento asbesto (amianto) e produzido por Hatschek em 1900. O termo “materiais compósitos” refere-se a todos os materiais sólidos constituídos por mais de um componente, em fases separadas (STRONG, 2008). A combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si é chamado de material compósito. Um desses produtos é a fase de reforço e o outro a matriz. O reforço é envolvido pela matriz, podendo apresentar também no compósito adições, como aditivos e materiais de enchimento (*fillers*), modificando e até melhorando suas propriedades. São alguns exemplos de materiais compósitos o concreto, a madeira e o osso humano (CARNEIRO e TEIXEIRA, 2008).

A utilização de compósitos é antiga, tendo sido retratada nas Sagradas Escrituras, onde o povo egípcio empregava palha na fabricação de tijolos (BENTUR e MINDESS, 1990). Em que já se sabia que adição de determinados materiais a outros proporcionaria melhorias nas características do conjunto.

Uma enorme variedade de materiais compósitos foi desenvolvida ao longo do tempo, com numerosas funcionalidades e aplicações, desde a construção civil até a indústria aeroespacial. A principal vantagem é por ser um material de alta relação resistência-peso próprio, ou seja, um material com bom desempenho sem aumento relevante de seu peso (PASA, 2007).

Em geral, a matriz representada pela fase contínua, protege o reforço que fica disperso na matriz do ambiente externo, evitando assim que o material disperso tenha contato com meios ácidos ou corrosivos, além da matriz manter o reforço no lugar e transmitir a tensão para o reforço. Na tabela a seguir (Tabela 4.1), os papéis de matriz e o reforço estão resumidos. Além disso, o reforço pode ser formado por fibras ou partículas.

Tabela 4.1 - Papéis da matriz e reforço num compósito

Matriz	Reforço
dar forma à peça compósita	dar resistência, rigidez e outras propriedades mecânicas do compósito
proteger os reforços do ambiente	
transferir as cargas para os reforços	dominar outras propriedades, tais como o coeficiente de expansão térmica, condutividade e transporte térmico
contribuir para as propriedades que dependem tanto da matriz e os reforços, tais como tenacidade	

Fonte: STRONG (2008)

A utilização de compósitos cresceu em diversidade, encontrando-se várias aplicações na construção civil como telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de concreto como túneis e pavimentos, onde o concreto reforçado com fibras vem tendo sua aplicação aumentando progressivamente (ACI 544, 1R, 2009). Um dos exemplos de compósito é o fibrocimento, que é um tipo clássico e muito empregado na indústria da construção civil no Brasil. Trata-se de uma matriz de pasta de cimento com reforço de fibras de amianto. A sua utilização se deu no início do século XX e se expandiu por vários países. Hoje, não é empregado em vários países devido aos riscos que o amianto reflete à saúde humana (SIMPLÍCIO, 2008).

A adição de fibras tem sido usada em diversos materiais de engenharia civil, principalmente em matrizes cimentícias. No meio desses materiais, está o concreto, que possui baixa resistência aos esforços de tração. Por essa razão, adiciona-se ao concreto simples armadura contínua absorvendo as tensões de tração, formando o concreto armado. Ou ainda fibras distribuídas aleatoriamente que melhoram, por exemplo, a resistência à tração, módulo de elasticidade, controle de fissuras e a durabilidade do concreto.

4.2 CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS (CRF)

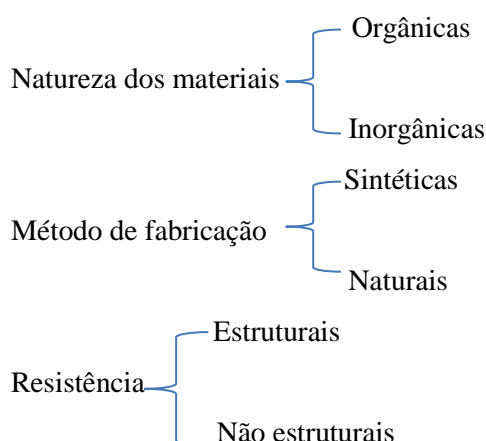
O concreto é um material que apresenta boa resistência à compressão, porém possui baixa resistência à tração. No caso do concreto armado, o aço é o responsável por suportar todo o esforço de tração. Além disso, a matriz de concreto pode ser reforçada com fibras que são capazes de resistir parte das tensões de tração que atuam na matriz, produzindo uma melhora de sua resistência à tração. O concreto com fibras é um concreto contendo um cimento hidráulico, água, agregados miúdos, agregados graúdos e fibras discretas descontínuas. Ele pode conter também adições minerais para melhorar a sua resistência e/ou trabalhabilidade. As fibras usadas podem ser de várias formas, tamanhos e materiais, como aço, vidro, plástico e naturais, sendo as fibras de

aço as mais utilizadas, para muitos elementos estruturais e não estruturais. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com Sant'Anna (2005), o concreto reforçado com fibras é caracterizado macroscopicamente como um material monofásico e como um compósito com duas fases ligadas entre si (concreto + fibras). É nesta interação na interface concreto-fibra do compósito onde se dá a eficiência de melhorar o comportamento do compósito. Ferreira (2008) citou aplicações em que as fibras são mais eficientes:

- Materiais/estruturas muito esbeltas;
Cargas locais e deformações locais muito elevadas, casos como revestimentos em túneis, estruturas resistentes a explosões e estacas;
- Controle de fendilhamento induzido por umidade ou diferenças de temperatura (laje ou pavimentos).

As fibras podem ser classificadas de acordo com diferentes fatores (CORNEJO, 2007):



Existem vários tipos de fibras que podem ser introduzidas na matriz cimentícia. O tipo de fibra a ser adotado depende quais características se deseja obter no compósito. Fibras que possuem módulo de elasticidade menor e alongamento maior do que a própria matriz de cimento, a exemplo das fibras de polipropileno e polietileno, tem uma boa capacidade de absorver energia, grande resistência ao impacto e alta tenacidade. No entanto, esse tipo de fibra não em melhorar a resistência do compósito. Já em relação às fibras com elevado módulo de elasticidade e resistência, fibras de aço, vidro e carbono, os compósitos produzidos possuem alta resistência à tração, rigidez e resistência à cargas dinâmicas (OLIVEIRA, 2005). Na Tabela 4.2 têm-se alguns exemplos de fibras usadas como reforço no concreto, também informações referentes às características da matriz de cimento.

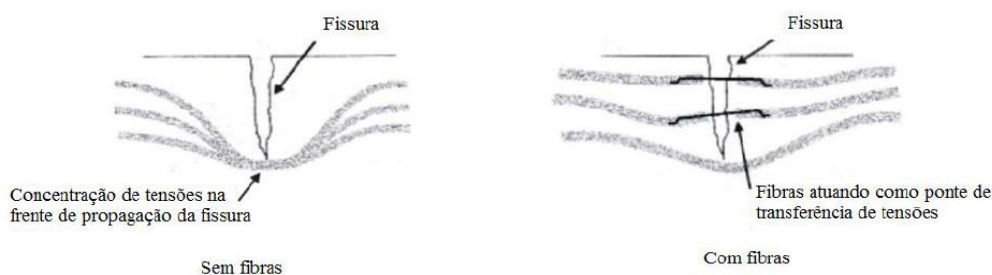
Tabela 4.2 - Principais características das fibras utilizadas como reforço em concreto

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2,5-4,0	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6-3,4	164-196	3,1-3,5	2-3
Polipropileno fibrilado	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Kevlar	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2,0-4,5
Carbono	08-09	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Fibra de Madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3
Matriz de cimento (para comparação)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: BENTUR; MINDESS (1990)

Para que a fibra sirva para a manufatura de concreto, deve ter boa resistência à tração equiparada ao concreto e apresentar certo grau de ductilidade. As fibras de aço, carbono e vidro, mais usadas no concreto, como pode ser visto na Tabela 4.2, são as que apresentam maior resistência à tração, no entanto, as de aço se evidenciam por apresentarem além dos requisitos exigidos, baixo custo quando comparadas às de carbono, por exemplo. Já as fibras de vidro devem ser resistentes aos álcalis, assim limitando um pouco seu uso. As fibras funcionam como ponte de transferência de tensões através das fissuras que surgem no concreto (BENTUR; MINDESS, 1990), Figura 4.1. Após a ruptura da matriz de concreto e durante o tempo que atuam como ponte, as fibras sofrem um processo de arrancamento que solicita energia extra para deformação e ruptura do compósito, conferindo uma maior tenacidade. Porém, o aumento da tenacidade do compósito, depende da interação da matriz com a fibra de aço, garantido então a transferência de tensões da matriz para as fibras e vice-versa (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Figura 4.1 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões



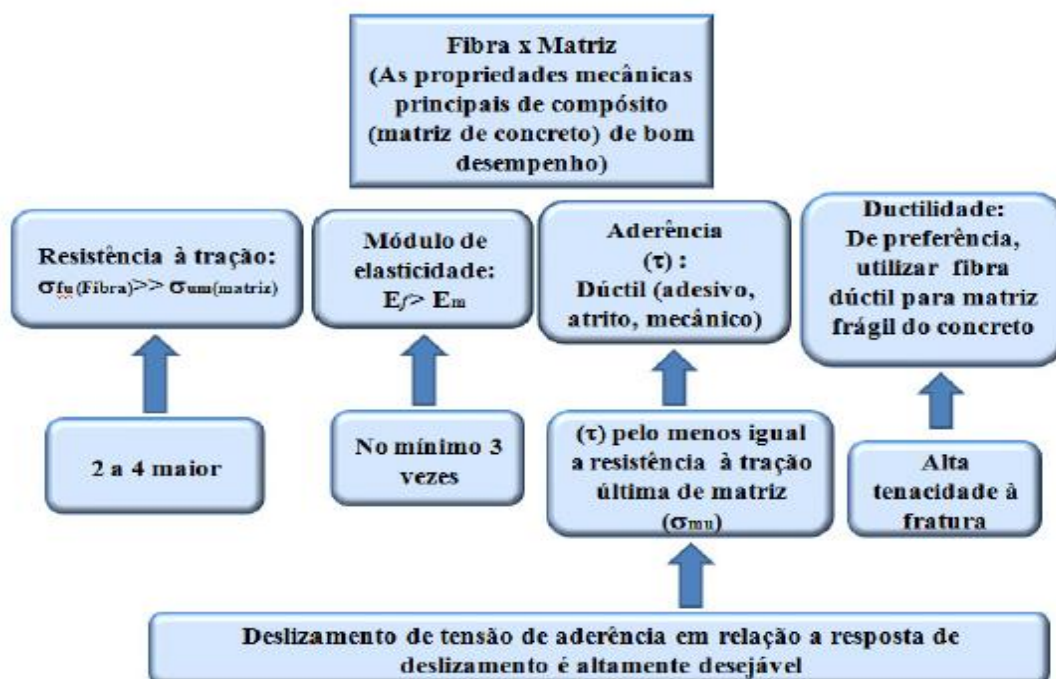
Fonte: NUNES; AGOPYAN (1998)

Ganesan et al. (2014), cita que a função mais importante das fibras no concreto é a ponte através das rachaduras e retardar a propagação destas, proporcionando a ductilidade pós-pico. Todavia, a falha no concreto acontece progressivamente sob uma carga aplicada, as microfissuras pré-existentes crescem e se juntam para formar macrofissuras. Estas macrofissuras aumentam a um valor constante até chegar uma propagação instável e se ter uma falha brusca.

Segundo Naaman (2003), para alcançar o melhor desempenho e maior eficiência da matriz de concreto reforçada com fibras, o coeficiente de Poisson e o coeficiente de expansão térmica devem ser da mesma ordem de grandeza e as fibras devem ter as seguintes propriedades (Figura 4.2):

- A resistência à tração deve ser maior que a do concreto (de duas a quatro vezes);
- A força de aderência à matriz de concreto (τ) deve ser preferencialmente igual ou maior do que a resistência à tração da matriz;
- O módulo de elasticidade da fibra deve ser maior do que o da matriz de concreto em pelo menos três ordens de grandeza.

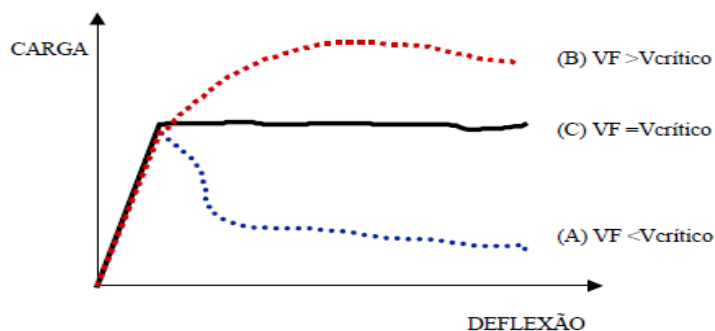
Figura 4.2 - Fibras adequadas x propriedades da matriz



Fonte: NAAMAN (2003)

Segundo Figueiredo (2000), dois fatores influenciam no comportamento do concreto reforçado com fibras, o volume crítico e o comprimento crítico. Para o volume crítico, este é definido como o volume correspondente ao teor de fibras que mantém a mesma eficiência portante para o compósito quando a matriz rompe. Se o teor de fibras for menor que o volume crítico, no momento que ocorre a ruptura da matriz há uma queda de carregamento que o material pode resistir. O volume acima do crítico, mesmo após a ruptura da matriz, o compósito suporta níveis de carga gradativos. A Figura 4.3 ilustra este conceito, onde tem-se curvas de carga por deflexão, para prismas de concreto reforçados com fibras e rompidos à flexão.

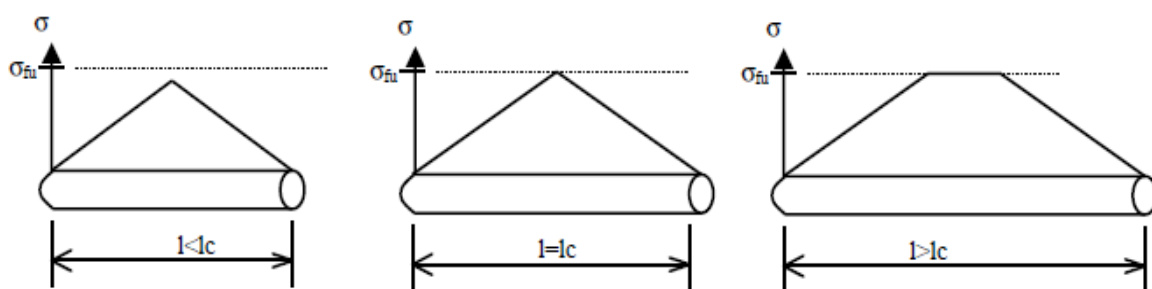
Figura 4.3 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: FIGUEIREDO (2000)

O segundo fator de eficiência no desempenho está associado à redução de desempenho do concreto com fibras, ocasionado pela utilização de fibras descontínuas curtas. Este fator é determinado pelo comprimento crítico (l_c) que é definido como o menor comprimento necessário para a transferência de tensão entre a matriz e a fibra, aumentando linearmente dos extremos para o centro da fibra. Quando esta tensão chega ao máximo, a fibra está sujeita a uma tensão igual à tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz. A seguir, a Figura 4.4 apresenta as possíveis distribuições de tensão na fibra de acordo com o comprimento crítico: $l < l_c$, $l = l_c$ e $l > l_c$, onde l = comprimento da fibra (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 4.4 - Distribuição possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico

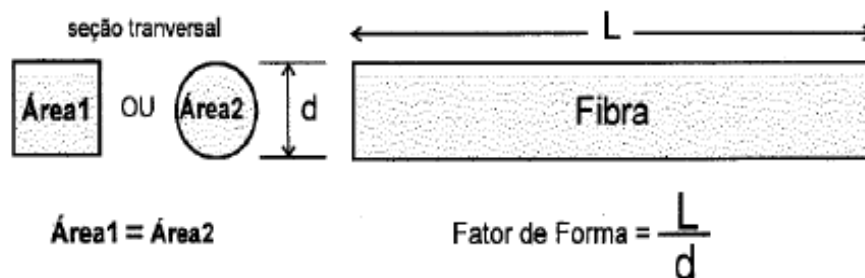


Fonte: BENTUR e MINDESS(1990)

A diferença na tendência de deformação entre as fibras e a matriz é o que define o funcionamento básico do reforço por fibras no concreto. Inicialmente, tanto a matriz como as fibras se deformam simultaneamente, até que a matriz se rompe e o esforço que era resistido pela matriz é transmitido para as fibras. Contudo, além das propriedades da fibra, a aderência na área de interação fibra-matriz é de destaque para a eficiência do reforço. Essa aderência é verificada em ensaios de arrancamento, onde é possível perceber diferença no desempenho das fibras, a partir da geometria. As fibras de forma lisa e reta tendem a perder muito rápido a aderência, quando se inicia o seu escorregamento. Já no caso das fibras com gancho nas suas extremidades, antes do escorregamento o gancho tende a ser retificado. Dessa forma, as fibras com gancho aumentam a resistência e a energia dispersa durante o ensaio.

Nas fibras lisas, o aumento do fator de forma (a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro da seção transversal – Figura 4.5) ocasiona aumento na ductilidade do concreto, sendo seu limite máximo estabelecido pela capacidade de misturá-las ao concreto. As fibras com ganchos nas extremidades propiciam maior capacidade de absorção de energia ao concreto do que as fibras lisas. Porém, o aumento do fator de forma não é tão significativo quanto nas fibras lisas (ARAÚJO, 2002).

Figura 4.5 - Definição do fator de forma da fibra

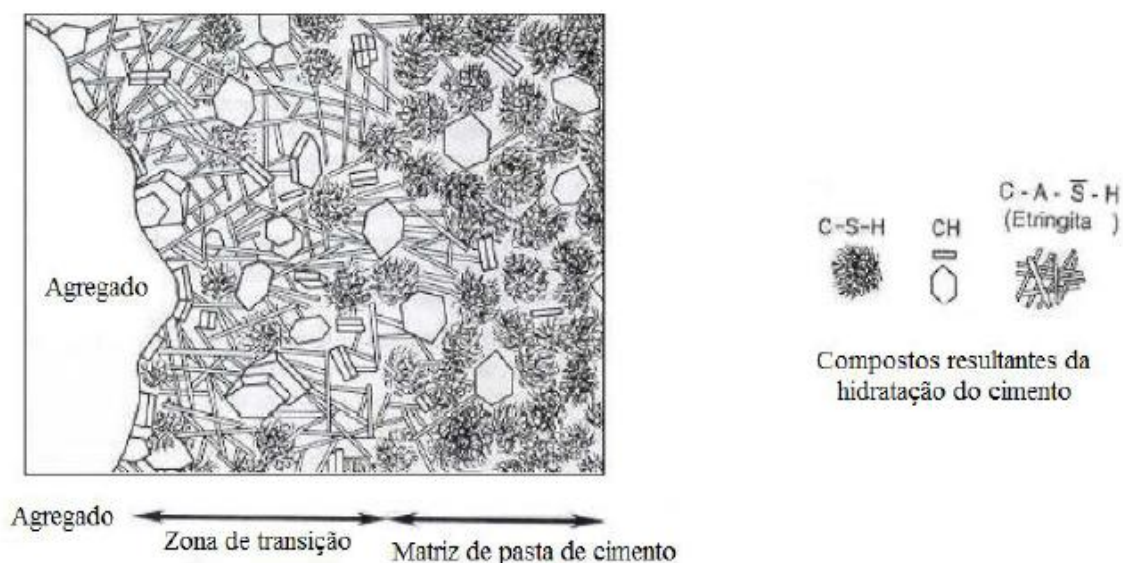


Fonte: NUNES; AGOPYAN(1998)

A fibra por ser descontínua é menos eficaz que a armadura contínua (fios e barras) em relação à resistência aos esforços de tração e de cisalhamento. Porém, o uso de fibras atua como maior obstáculo ao desenvolvimento de fissuras, pois o espaço entre elas é reduzido. As fibras interceptam as microfissuras durante o processo de endurecimento da pasta. Também retardam e evitam o aparecimento prematuro das microfissuras. Além disso, a abertura e o comprimento das fissuras tornam-se menores na mistura já endurecida. No entanto, a adição de fibras diminui a trabalhabilidade da mistura resultante, e ainda pode afetar a qualidade do concreto. A incorporação de fibras, especialmente as de maiores dimensões, produz uma maior restrição à mobilidade relativa das partículas, principalmente os agregados de maiores diâmetro, dificultando a fluidez da mistura. (FIGUEIREDO, 2011). A trabalhabilidade da mistura, por sua vez, pode ser melhorada com o uso de aditivos superplastificantes e com a substituição de parte do cimento por pozolanas. Pode-se, também, aumentar a relação água/cimento, embora ocorra perda na resistência e, acima de determinado valor, torne-se ineficiente (ARAÚJO, 2002).

O concreto é um material de microestrutura complexa, devido a sua heterogeneidade: há a pasta de cimento endurecida, os agregados e a zona de transição (região da pasta de cimento em contato com os agregados ou fibras, com características diferentes do restante da pasta) (Figura 4.6). A alta porosidade da zona de transição é decorrente da elevação da relação água/cimento devida à exsudação interna, criando planos preferenciais de ruptura (METHA; MONTEIRO, 1994). É nessa interface que se desenvolve a microfissuração. Uma forma de se melhorar a aderência entre as fibras e a matriz é diminuindo o volume de vazios na zona de transição, pelo uso de sílica ativa, aditivo superplastificante, ou aumentando o consumo de cimento. Melhorando-se a aderência, há reflexos positivos na resistência à tração e na ductilidade.

Figura 4.6 - Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado

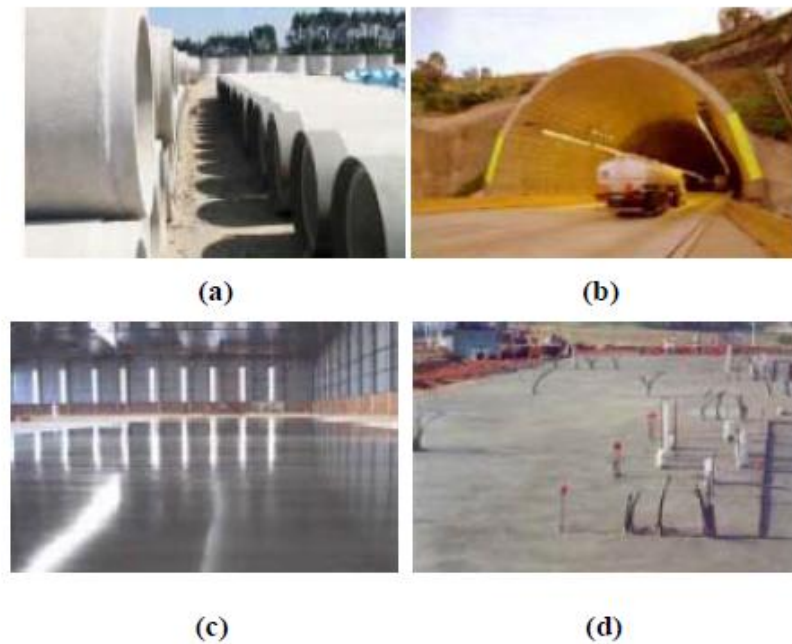


Fonte: METHA; MONTEIRO (1994)

4.3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CRFA)

A aplicação estrutural do concreto reforçado com fibras de aço teve início em 1971, com a produção de painéis para pavimentação de garagens e pistas de pouso. Posteriormente, obras de estabilização de taludes começaram a utilizar concreto projetado com adição de fibras de aço, como alternativa para o concreto projetado armado com malha de aço, técnica também empregada para revestimentos de túneis, Metha e Monteiro (1994). A partir de então, o uso de concreto com fibras de aço para fins variados principalmente no Japão, América do Norte e Europa (GARCEZ, 2005). Hoje, as principais aplicações englobam a execução de pavimentos, lajes, revestimento de túneis, construção e reparo de rodovias, pistas de pouso, pisos industriais, construção e reparo de barragens, construção e reparo de tabuleiros de pontes, revestimento de canais, minas, túneis e galerias, especialmente com o uso de concreto projetado. Concretos com fibras também são usados para fabricação de painéis modulares pré-moldados, tubulações e aduelas (GARCEZ, 2005). A ilustração (Figura 4.7) mostra algumas aplicações.

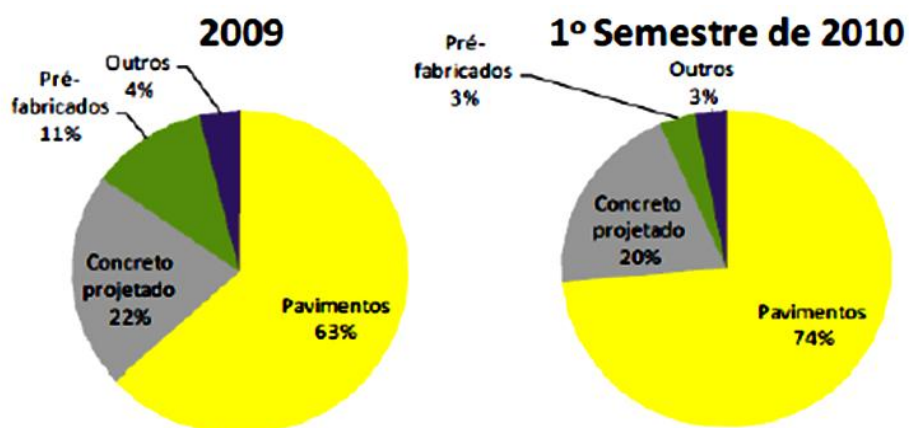
Figura 4.7 - Exemplos de aplicação de concretos reforçados com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) radier



Fonte: GARCEZ (2005)

O mercado de fibras no Brasil é concentrado em aplicações de baixo consumo de fibras e estruturas contínuas. A utilização de fibras de aço é maior em infraestruturas nas quais podem ocorrer fissuras devido às tensões internas e externas. Em segundo lugar, a aplicação em concreto projetado e em terceiro pré-moldados, como se observa na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Distribuição de fibras de aço por tipo de aplicação no Brasil



Fonte: FIGUEIREDO (2011)

De acordo com o ACI 544, 1R, 2009, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é o concreto convencional com a adição de fibras de aço descontínuas. Sob tensão, o CRFA rompe após ocorrer a ruptura ou arrancamento da fibra da matriz de cimento. A Figura 4.9 mostra uma superfície fraturada típica num concreto reforçado com fibras de aço. As propriedades do CRFA, tanto no estado fresco como endurecido, incluindo sua durabilidade, dependem da natureza das fibras. Sendo ainda tema de pesquisa a mecânica de reforço do concreto ou da argamassa. Uma aproximação para a mecânica do CRFA é considera-lo um material composto cujas propriedades estão relacionadas às propriedades das fibras, do concreto e da interface entre fibra e matriz.

Figura 4.9 - Superfície fraturada do CRFA



Fonte: ACI 544, 1R(2009)

Entre os tipos de fibras metálicas as mais usadas são as fibras de aço. O propósito de se adicionar este tipo de fibra ao concreto é melhorar a tenacidade, o controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga. Possuem formas variadas, seção circular ou retangular, onduladas, com extremidade reta, com gancho ou pino, com o objetivo de aumentar a aderência com a matriz cimentícia (Figura 4.10). Em relação à fabricação, dentre os vários processos, o que mais se destaca é o corte de arame trefilado de aço de baixo teor de carbono (SIMPLÍCIO, 2008).

Figura 4.10 - Diferentes tipos de fibras de aço



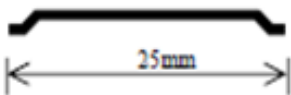
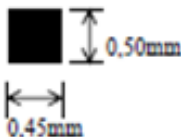


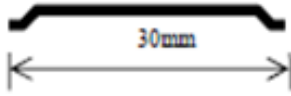
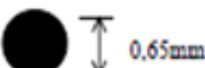
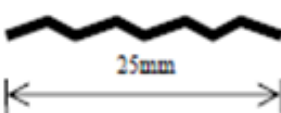
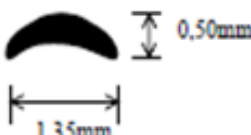
Fonte: WEILER (1996)

O ACI 544, 1R (1996) define as fibras de aço para reforço do concreto como sendo, comprimentos discretos de aço, com relação de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro

da seção transversal) entre 20 e 100, com várias formas de seção transversal, sendo em tamanho (pequenas) satisfatória a dispersão aleatória e a mistura no concreto fresco por procedimentos comuns. A finalidade do uso dessa fibra é melhorar a tenacidade, resistência à flexão, resistência ao impacto e fadiga e o controle da fissuração do compósito.

A respeito da geometria das fibras, diversas formas apareceram ao longo dos anos, resultante do processo industrial de fabricação das fibras de aço, além do propósito de se melhorar a ancoragem na matriz de cimento (OLIVEIRA, 2005). Como mostrado na Figura 4.11 a seguir.

Figura 4.11 - Características geométricas de algumas fibras de aço

FIBRA	FORMATO LONGITUDINAL	SEÇÃO TRANSVERSAL	FATOR DE FORMA
F1			46,7
F2			60,0
F3			46,2
F4			27,3

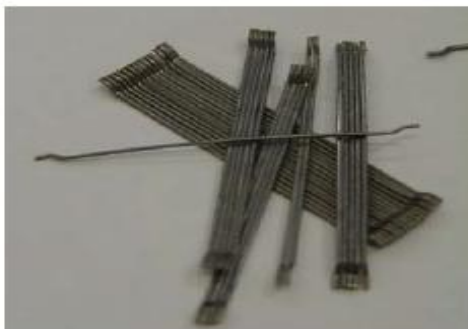
Fonte: FIGUEIREDO (2000)

A ancoragem das fibras de aço, em particular as que possuem deformidade nas extremidades, é eficaz na transferência de tensão entre as faces da fissura, concedendo ao compósito maior capacidade de resistir a cargas em níveis de deslocamento superiores caso a matriz não fosse reforçada, sendo o domínio da fissuração do compósito regido pelo processo de arrancamento das fibras (GARCEZ, 2005).

Frequentemente, o tipo de aço usado na fabricação das fibras é o aço-carbono. Outros tipos de aço podem ser utilizados para melhorar algumas propriedades mecânicas desejadas, como, por exemplo, para se obter fibras resistentes à corrosão em estruturas refratárias ou

marítimas. As fibras de aço podem ter comprimento que variam de 5 mm a 65 mm e os diâmetros de 0,10 mm a 1,0 mm. Estas fibras possuem tensão de tração entre 345 a 2100 MPa, módulo de elasticidade de 200 a 210 GPa e deformação na ruptura de 0,5% a 3,5% (LOPES, 2005). Dependendo do meio onde se inserem, as fibras de aço podem manifestar problemas de corrosão. Para minimizar este problema uma técnica desenvolvida é o banho de níquel (TOJAL, 2011). Para facilitar o manuseio das fibras, estas podem vir coladas umas nas outras em feixes (pentes) através de cola solúvel em água que se desmancha durante o procedimento de mistura no concreto. Geralmente, as fibras que apresentam diâmetros maiores são comercializadas na forma de pentes, Figura 4.12. Essas fibras com diâmetros menores vendidas na forma de fibras individuais soltas, como notado na Figura 4.13 (GARCEZ, 2005).

Figura 4.12 - Fibras de aço com extremidades deformadas, coladas em forma de pentes



Fonte: GARCEZ (2005)

Figura 4.13 - Fibras de aço com extremidades deformadas, produzidas soltas



Fonte: GARCEZ (2005)

As propriedades geométricas, o teor (volume) das fibras e a dimensão máxima dos agregados são pontos significativos a serem levados em consideração. O tamanho máximo dos agregados tem grande influência no concreto com fibras, uma vez que não se devem ter partículas maiores que 20 mm para não tornar difícil a disposição uniforme das fibras (OLIVEIRA, 2005).

A adição de fibras de aço na matriz de concreto pode substituir parcialmente as telas soldadas e os estribos em elementos pré-moldados. O CRFA tem sido usado em diversas aplicações, como indicado na Tabela 4.3. O concreto armado com reforço fibroso pode ser um material de construção econômico e eficiente (ARIF, 2014).

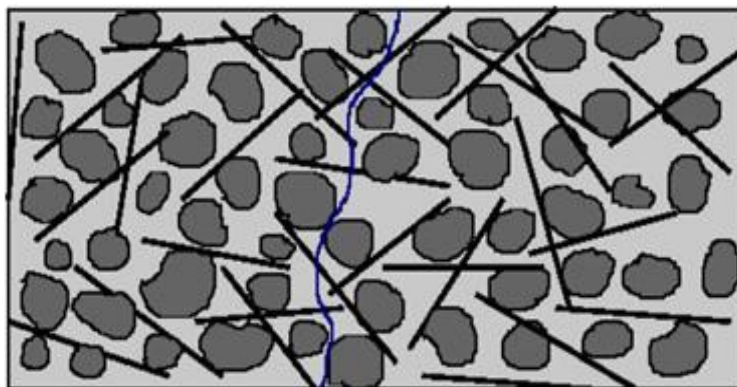
Tabela 4.3 - Diversas aplicações do concreto reforçado com fibras

Tipo de estrutura	Razões para aplicação de CRFA
Estruturas hidráulicas (barragens, descarregadores, etc.)	Resistência à cavitação
Pavimentos (aeroportos, auto-estradas, reforço de pavimento)	Redução da espessura do pavimento
Pisos industriais	Resistência ao impacto e resistência ao choque térmico
Concreto refratário (fornos rotativos, incineradores municipais, produção de metal, aplicação petroquímicas)	Resistência à fissuração e destacamento onde os ciclos térmicos e choque térmico são ações preponderantes
Tabuleiros de pontes	Como reforço de pavimento
Cobertura a concreto projetado	Estabilização de taludes e banquetas; revestimento em obras subterrâneas
Estruturas resistentes a choque	Em combinação com armadura convencional, oferece resistência á penetração
Possível uso em estruturas sísmicas resistentes	Aumento da ductilidade atrasando a propagação de fraturas por corte

Fonte: FERREIRA (2008)

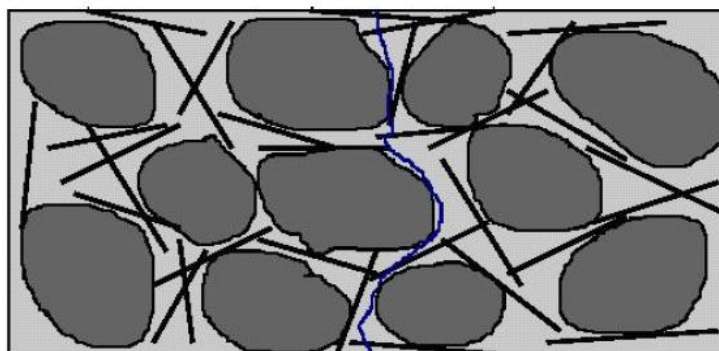
Quanto maior o agregado, maiores serão os problemas de interferência fibra-agregado, podendo inclusive diminuir a capacidade do mecanismo de atuação das fibras. Logo, deve haver uma coerência dimensional entre agregados e fibras, garantindo então que as fibras entrecruzem de forma mais eficiente às fissuras que vão aparecendo no compósito. Nas Figuras 4.14 e 4.15 são mostradas as diferenças entre um concreto com agregados e fibras compatíveis (Figura 4.14) e um concreto onde isso não ocorre (Figura 4.15).

Figura 4.14 - Concreto com fibras onde há compatibilidade entre fibras e agregado graúdo



Fonte: FIGUEIREDO (2010)

Figura 4.15 - Concreto com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e agregado graúdo



Fonte: FIGUEIREDO (2010)

Percebe-se que quando não existe compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões nas aberturas (fissuras). No entanto, pode-se empregar duas maneiras de otimizar a mistura de concreto com fibras, ou diminuir a dimensão máxima do agregado ou usar fibras mais longas. Na construção de pavimentos, não é necessária maiores restrições quanto à dimensão dos componentes presentes no concreto, sendo possível a aplicação de fibras mais longas como a apresentada na Figura 4.16a, admissíveis com agregados de maiores dimensões (19mm e 25mm). Para o caso do concreto projetado, a dimensão máxima característica dificilmente passa dos 9,5mm, o emprego de fibras curtas (Figura 4.16b) torna simples aplicar o material, pois o mesmo se moverá num mangote (FIGUEIREDO, 2010).

Figura 4.16 - Fibras de aço longas (a) e curtas (b)



Fonte: FIGUEIREDO (2010)

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, de forma a alcançar o objetivo principal desta pesquisa, são descritos os procedimentos para a realização dos ensaios de caracterização dos materiais e dos ensaios tais como geometria dos corpos de prova, instrumentação e equipamentos empregados durante os ensaios.

Nesse trabalho, foi usado o método de dosagem da ABCP-Associação Brasileira de Cimento Portland, adaptado do método americano proposto pelo ACI – American Concrete Institute, desenvolvida nos estudos de Rodrigues (1995).

O programa experimental compreendeu o estudo da aderência em modelo de vigas submetidas à flexão. Foram empregados os modelos para estudo da aderência aço-concreto, utilizando concreto convencional com resistência de 30 Mpa e com reforço de fibras. Para os ensaios de compressão do concreto, foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos, sem reforço e reforçado com fibras metálicas de aço, em cada dia de produção de concreto para moldagem das vigas, três a cada dia. Para o ensaio de viga foram utilizados 6 corpos-de-prova para cada variável, conforme mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Nomenclatura e quantidade dos corpos-de-prova de vigas

Tipo	Série	Quantidade de corpos-de-prova de vigas
CC	1	6
CRFA	2	6

Fonte: autora

Na primeira coluna da Tabela 5.1 CC e CRFA correspondem, respectivamente, ao concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

5.1.1 MATERIAIS

Os materiais empregados para a produção do concreto usado neste trabalho foram cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, superplastificante, fibras metálicas e água.

- **Cimento Portland**

Na confecção do concreto, foi utilizado o Cimento Portland CP IIZ-32 RS da marca Poty do grupo Votorantim.

- **Agregados**

Os agregados miúdo (Tabela 5.2) e graúdo (Tabela 5.3) foram caracterizados no LAMCE (Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe.

Tabela 5.2 - Características do agregado miúdo

Características	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida em massa	
		Média retida (%)	Acumulada (%)
Granulometria	4,8	1	1
	2,4	7	8
	1,2	9	17
	0,3	37	68
	0,15	22	90
	Fundo	10	100
DMC (mm)	4,8		
Módulo de finura	2,15		
Massa específica (g/cm ³)	2,54		

Fonte: autora

Tabela 5.3 - Características do agregado graúdo

Características	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida em massa	
		Média retida (%)	Acumulada (%)
Granulometria	19,1	1	1
	9,5	65	66
	4,8	34	100
	2,4	0	100
	1,2	0	100
	0,6	0	100
	0,3	0	100
	0,15	0	100
	Fundo	0	100
DMC (mm)	19,1		
Módulo de finura	6,65		
Massa específica (g/cm ³)	2,77		

Fonte: autora

- **Fibras metálicas**

Como reforço fibroso foram usadas fibras metálicas de aço com baixo teor de carbono, fabricadas pela Maccaferri Brasil e denominadas Wirand FF4. Possuem as características técnicas, descritas na Tabela 5.4, com informações retiradas do catálogo do fabricante.

Tabela 5.4 - Características técnicas das fibras de aço usada

Especificações	Wirand FF4
Comprimento (mm)	60
Diâmetro (mm)	0,75
Relação de aspecto (l/d)	80
Resistência à tração (MPa)	1100

Fonte: autora

A fibra de aço usada foi do modelo Wirand FF4 com ancoragem nas suas extremidades e são produzidas soltas, como mostra a Figura 5.1, classificadas segundo a ABNT NBR 15530:2007 como do tipo A e classe I. É usada na concentração de 1% em fração volumétrica na preparação do concreto reforçado com fibras.

Figura 5.1 - Fibras de aço Wirand FF4



Fonte: autora

- **Água de amassamento**

A água empregada na mistura de concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de São Cristóvão.

- **Aditivo**

O aditivo químico, neste caso, tem como intuito aumentar a trabalhabilidade das misturas com fibras, sem elevar a relação água-cimento. No presente estudo optou-se pelo superplastificante de terceira geração Viscocrete 5800 FTN produzido pela Sika. E a quantidade fixada de aditivo usada no traço do concreto foi de 1,0% em relação à massa de cimento. As informações técnicas de acordo com o fabricante estão na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Características técnicas do superplastificante Viscocrete 5800 FTN
(<http://bra.sika.com/dms/getdocument.get/34a88f6c-a343-3665-b4cedebaf224a541/Sika%20ViscoCrete%205800%20FTN.pdf>)

Características técnicas do superplastificante	
Teste	Especificação
Composição básica química	Policarboxilato em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho
pH	5,0 ± 1,0
Densidade	1,07 ± 0,02 kg/litro

5.1.2 DOSAGEM DOS MATERIAIS

O concreto foi produzido com dosagem para a resistência a compressão de 30 MPa, dosado a partir do método da ACI adaptado pela ABCP e apresentado por Rodrigues (1995). O traço adotado em massa foi 1:1,86:2,77, com relação água/cimento (a/c) de 0,46 e teor de argamassa igual a 50,8%. E para o concreto confeccionado com fibras, foi usado 1% em relação ao volume de concreto (fibras). O consumo dos materiais e o usado na confecção do concreto estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Consumo dos materiais na confecção do concreto

Material	Consumo de material por m³ de concreto
Cimento Portland CP II Z-32	398 kg
Areia	741 kg
Brita	1104 kg
Água	183 kg
Traço em massa: 1:1,86:2,77:0,46	

Fonte: autora

5.1.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

Os materiais foram misturados em betoneira de eixo inclinado e adicionados na seguinte ordem:

- Mistura de 2/3 do agregado graúdo e 2/3 da água com cimento;
- Adição da areia, restante da água, a brita, o cimento e o superplastificante.
- E por último acrescentadas as fibras, para o caso dos concretos reforçados com as fibras de aço, adicionadas com cuidado na mistura, Figura 5.2.

Figura 5.2 - Adição das fibras metálicas



Fonte: autora

5.2 AÇO

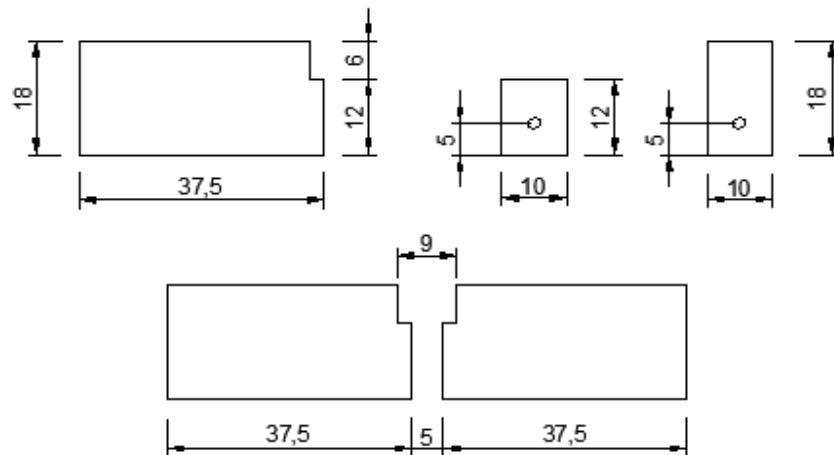
O aço utilizado nas barras de aderência, com diâmetro nominais de 10 mm, é do tipo CA-50, aço para concreto armado, cuja resistência ao escoamento é de 500 MPa.

5.3 ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

5.3.1 Geometria dos modelos

Na Figura 5.3a seguir é representada a geometria do modelo de viga utilizado para o tipo de barras de 10mm de diâmetro.

Figura 5.3–Geometria da fôrma para o modelo de viga



Fonte: autora

Todas as fôrmas foram produzidas com placas de madeira compensada plastificada com espessura de 10 mm. Foram confeccionadas de tal forma que pudessem ser desmontadas e reutilizadas várias vezes, Figura 5.4 e Figura 5.5.

Figura 5.4 - Formas desmontáveis de madeira compensada plastificada



Fonte: autora

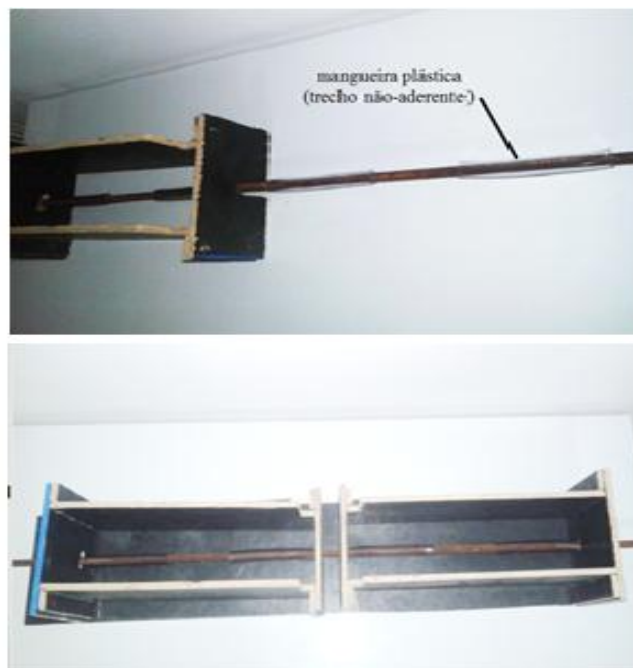
Figura 5.5 - Formas do modelo de viga



Fonte: autora

Na barra de aderência, os trechos não aderentes foram feitos usando mangueira plástica envolvendo a barra e com medidas de comprimento de acordo com a norma, RILEM RC5 (1982) e isoladas as aberturas da mangueira com fita adesiva para que não houvesse entrada da pasta de cimento (Figura 5.6).

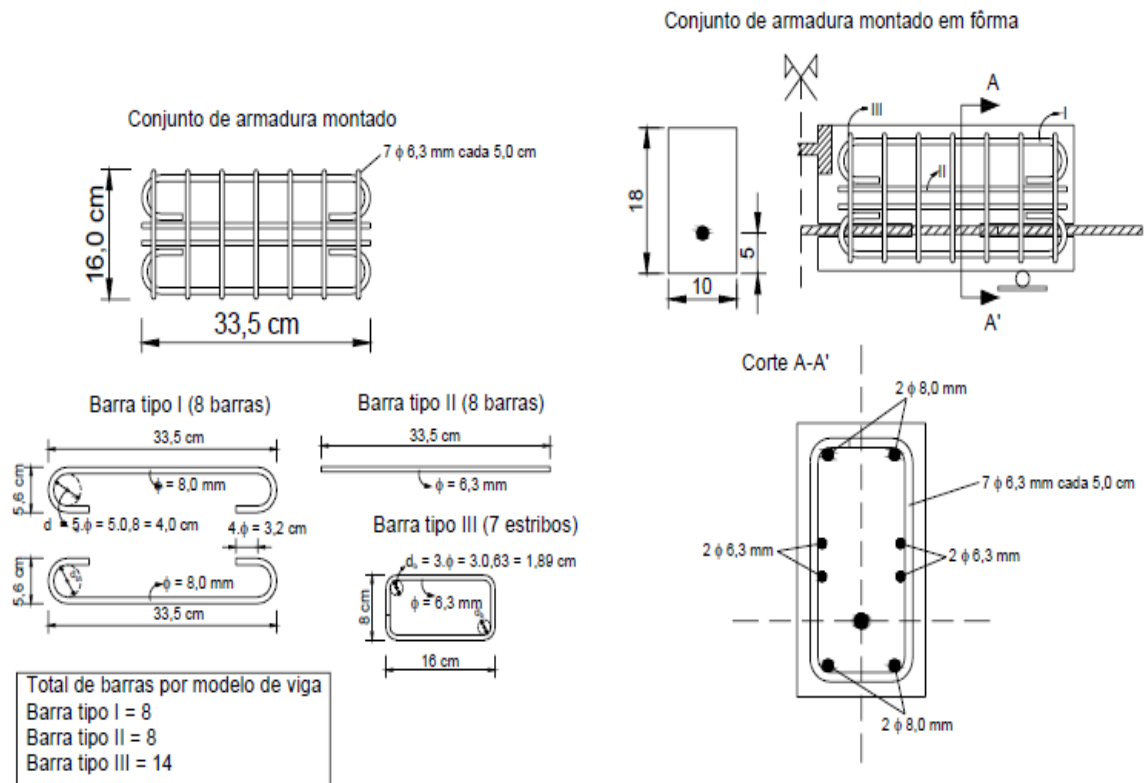
Figura 5.6 - Barra para ensaio de aderência com trecho não-aderente



Fonte: autora

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os detalhes das armaduras usadas no modelo de viga, segundo determinado pelo RILEM RC5 (1982).

Figura 5.7 - Detalhe da armadura do modelo de viga do (barra de 10 mm



Fonte: ALMEIDA (2006)

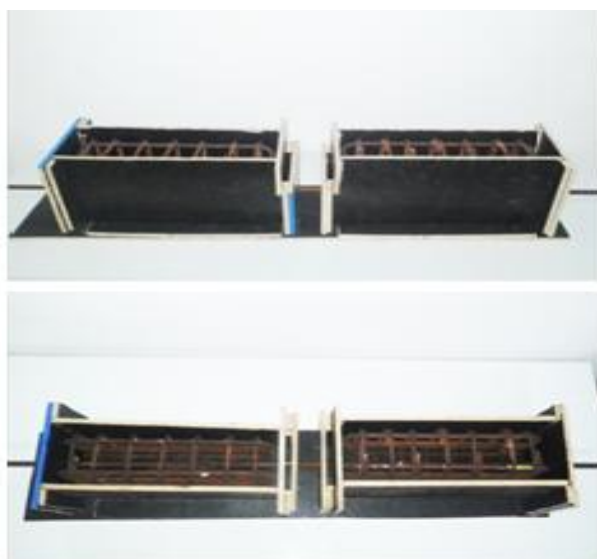
Figura 5.8– Armadura pronta do modelo usado na viga



Fonte: autora

O esquema das formas e armaduras que foi utilizado na fabricação dos modelos de viga pode ser visto nas Figura 5.9 e 5.10.

Figura 5.9 - Formas e armação usadas na produção das vigas



Fonte: autora

Figura 5.10 - Vigas prontas para serem concretadas



Fonte: autora

A Figura 5.11 mostra a rótula metálica desenvolvida para o ensaio, conforme estabelecido por RILEM RC5 (1982).

Figura 5.11 - Rótula do modelo de ensaio de viga



Fonte: autora

A Figura 5.12 a seguir apresenta os corpos de prova do modelo de viga para o ensaio de aderência.

Figura 5.12 - Corpos de prova com barra de 10 mm prontos para o ensaio de viga



Fonte: autora

5.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova para o ensaio de viga foram moldados na posição horizontal, isto é, com o eixo da barra de aço perpendicular à direção do lançamento do concreto. O concreto foi compactado em três camadas, com adensamento realizado com haste de metal e após 24 horas foram desmoldados e armazenados em tanque de cura, Figura 5.13 e Figura 5.14.

Figura 5.13 - Corpos de prova de viga moldados



Fonte: autora

Figura 5.14 - Corpos de prova em cura úmida

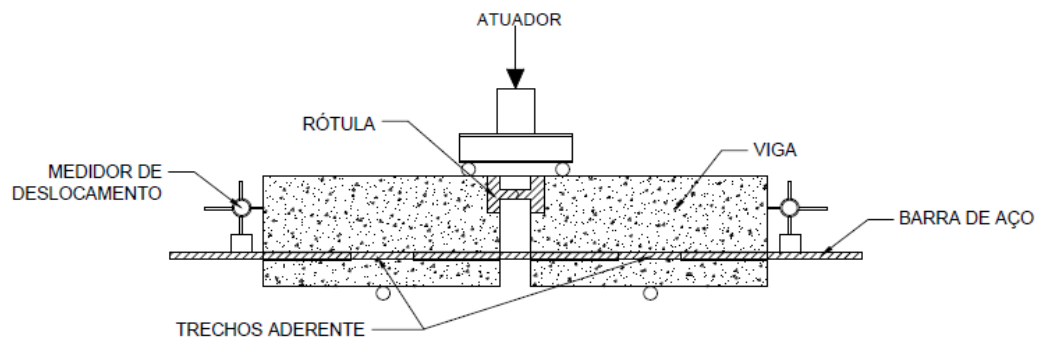


Fonte: autora

5.3.3 Instrumentação e aplicação do carregamento

Para medição dos deslizamentos foram posicionados relógios comparadores nas extremidades livres da barra de aço, como esquematizado na Figura 5.15.

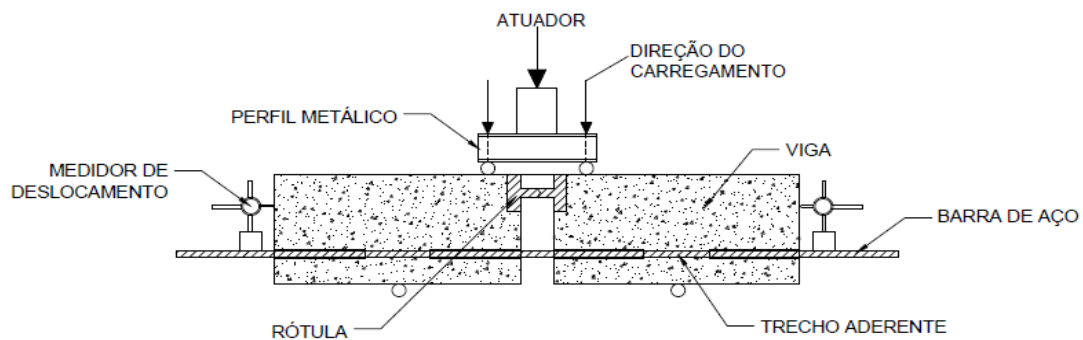
Figura 5.15 - Instrumentação do modelo de viga



Fonte: autora

A aplicação do carregamento do ensaio de viga foi feita por meio do atuador hidráulico e transmitido através de um perfil metálico à viga, apoiada em apoios do primeiro gênero, como mostrado na Figura 5.16.

Figura 5.16 - Aplicação do carregamento para o modelo de viga



Fonte: autora

5.3.4 Realização dos ensaios

Os ensaios foram realizados em uma prensa manual com macaco hidráulico do fabricante Marcon, modelo MPH 30 (Figura 5.17), com capacidade de até 30 toneladas, com manômetro graduado a cada 0,5 toneladas, conforme mostra a Figura 5.18.

Figura 5.17 - Prensa manual Marcon, modelo MPH 30



Fonte: autora

Figura 5.18 - Manômetro do macaco hidráulico graduado a cada 0,5 toneladas



Fonte: autora

Para assegurar a confiabilidade das medições dadas pelo manômetro do macaco hidráulico, foi realizada a calibração, usando um anel dinamométrico com capacidade de 10 toneladas (Figura 5.19).

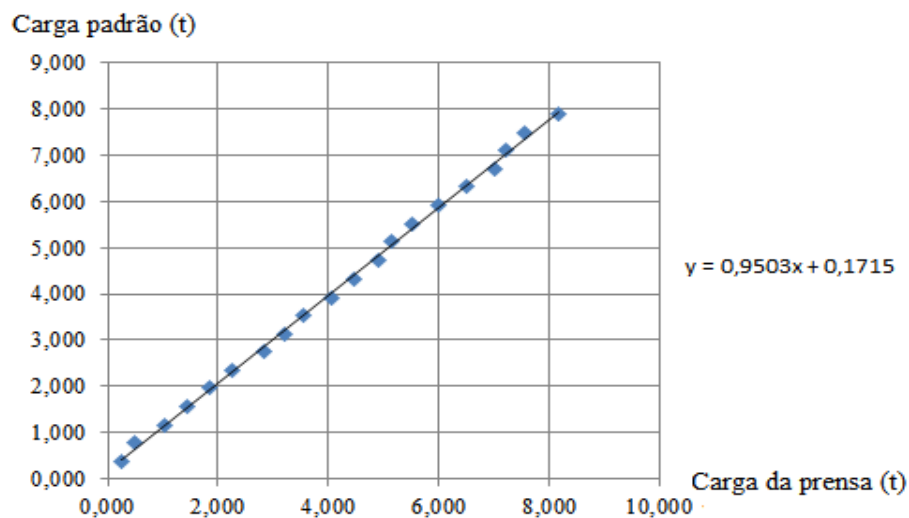
Figura 5.19 - Anel dinanométrico para calibração



Fonte: autora

Para cada valor de carga marcado pelo manômetro da prensa um valor de deformação era dado pelo relógio comparador do anel. A partir da tabela de leitura de calibração do fabricante (anel), deformação x carga, o valor de deformação do anel encontrado correspondia a valores de carga padrão que foram relacionados com os obtidos da prensa. Com os valores de carga da prensa e padrão foi obtida uma equação do 1º grau para correção, carga da prensa x carga padrão (Figura 5.20).

Figura 5.20 - Equação para correção das cargas

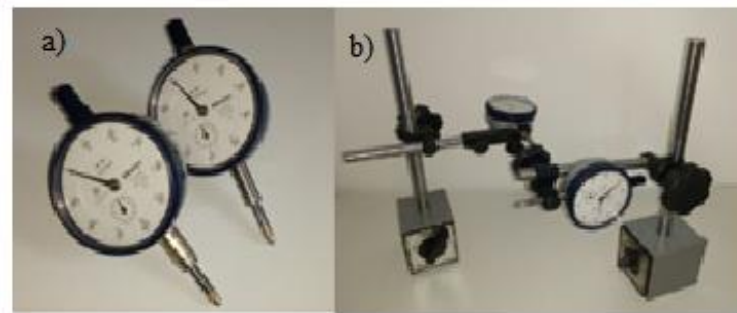


Fonte: autora

Os ensaios de vigas foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na recomendação RILEM RC5 (1982). Os corpos-de-prova de vigas foram ensaiados seis meses

depois de sua concretagem, para cada tipo de concreto, concreto simples e concreto reforçado com fibras, seis modelos, totalizando 12 ensaios. Os corpos-de-prova foram apoiados na prensa e foram utilizados relógios comparadores presos nas extremidades livres da barra, por meio de suportes magnéticos (Figura 5.21), para acompanhar o deslizamento da barra (Figura 5.22).

Figura 5.21 - Relógios comparadores a) e suportes magnéticos b)



Fonte: autora

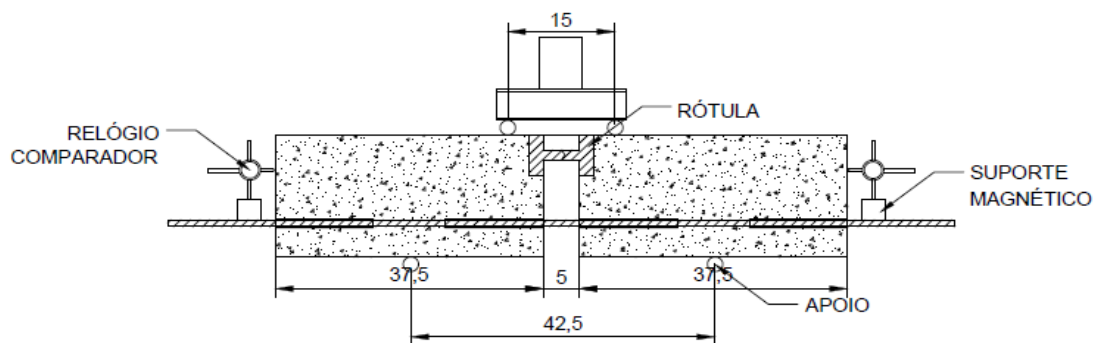
Figura 5.22 - Acompanhamento do deslocamento da barra



Fonte: autora

O carregamento foi aplicado manualmente, através do macaco sobre o perfil metálico, de modo a dividir por meio de dois pontos a carga aplicada à viga. A leitura dos deslocamentos da barra foi feita a cada 1 tonelada de carga aplicada. A viga foi apoiada na própria prensa e devido às suas dimensões a distância entre os apoios foi igual a 42,5 cm. As Figuras 5.23 e 5.24 mostram a montagem da viga e a estrutura para a realização dos ensaios de viga.

Figura 5.23 - Distâncias em que os apoios ficaram posicionados na viga



Fonte: autora

Figura 5.24 - Ensaio de viga



Fonte: autora

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos por meio da investigação teórica-experimental. Inicialmente, a resistência à compressão do concreto no estado endurecido é apresentada. E em seguida, são mostrados os resultados dos experimentos de aderência. Além disso, os resultados experimentais obtidos do ensaio de viga, *beam test*, são comparados com modelos analíticos encontrados na literatura para a curva tensão de aderência *versus* deslizamento. Os modelos usados compreendem o modelo de BARBOSA (2001), ALMEIDA (2006), CEB-FIP (1990) e HUANG et al. (1996) e o modelo de HARAJLI (1995), só para concreto reforçado com fibras, todos para concreto de classe de 30 MPa. Comparação com resultados de trabalhos experimentais de outros autores, ARAÚJO (2016), MELO (2016), SANTANA (2014) e SIMPLÍCIO (2008), também são feitas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

6.1.1 Estado fresco

No estado fresco foi verificada a consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, *slump test*, para o concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço segundo a norma NBR NM 67 (1998). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone

Concreto	Abatimento (cm)
CC	18
CRFA	16,8

Fonte: autora

A partir dos dados da Tabela 6.1, verifica-se que há uma redução no valor de *slump* com o acréscimo das fibras. Para o concreto com fibras, a redução em relação ao concreto convencional foi de 6,67%. Isso pôde ser verificado durante a preparação dos corpos de prova, pois para o concreto com fibras houve dificuldade no adensamento do concreto. Fusco (1995) afirma que a adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples diminui a trabalhabilidade, independentemente do tipo de fibra. A perda é proporcional à concentração do volume de fibras no concreto, e também por sua relação de aspecto.

6.1.2 Estado endurecido - resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão do concreto foi determinada por meio do ensaio de oito corpos de prova, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada série executada, concreto sem fibras (CC) e concreto reforçado com fibras (CRFA). Os procedimentos de ensaios de resistência à compressão foram feitos de acordo com a norma NBR 5739:2007 e os ensaios realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFS, na prensa acoplada à máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 20000, com célula de carga de 100 tf (Figura 6.1).

Figura 6.1 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: autora

Os corpos-de-prova foram rompidos com a mesma idade dos ensaios de viga, aos 180 dias e os valores estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios de compressão médios, desvios padrões e coeficientes de variação para os corpos de prova CC e CRFA

Tipo de Concreto	f_c (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
CC	44,69	4,60	10,29
CRFA	36,39	4,20	11,54

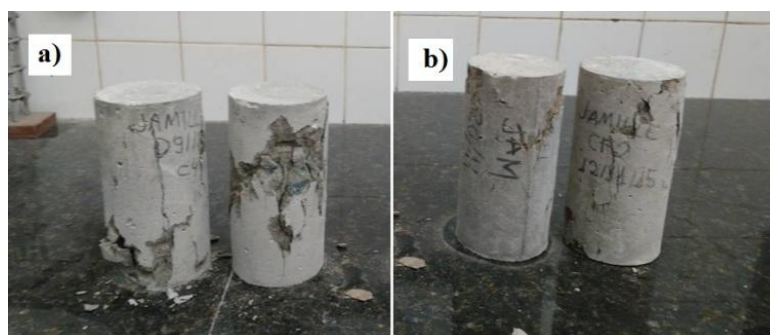
Fonte: autora

Da análise da Tabela 6.2 é possível ver que houve diminuição da resistência à compressão, para os corpos de prova CRFA. Figueiredo (2000) afirma que alguns trabalhos

propõem que a adição de fibras ao concreto diminui a resistência à compressão do concreto. Segundo o autor essa redução é consequência da má preparação do material. De acordo com Ramli e Dawood (2011) a menor resistência à compressão pode ser referida à distribuição não homogênea das fibras na matriz de concreto. Uma outra das explicações possíveis, é que a distribuição de fibras aleatoriamente funcionam como falhas na matriz (concreto).

Os corpos de prova de concreto reforçados com fibras ensaiados à compressão apresentaram ruptura diferente daquela apresentada pelos corpos de prova de concreto convencional. Como mostram as Figuras 6.2 (a - b), houve uma menor quantidade de fissuras dos corpos de prova de CRFA.

Figura 6.2–(a) Corpo de prova de concreto convencional (b) Corpo de prova de concreto reforçado com fibras, após ensaio de compressão axial



Fonte: autora

6.2 ENSAIO DE VIGA

6.2.1 Resultados do ensaio de viga - carga x deslizamento

A Tabela 6.3 apresenta os valores das cargas máximas de aderência obtidas para cada corpo-de-prova do ensaio de viga, ou seja, a aplicação da carga máxima suportada pela viga e que pôde ser medida pelo manômetro da prensa. Na segunda e quarta coluna da referida tabela, P_{cc} e P_{crfa} representam, respectivamente, a carga máxima de aderência para o concreto convencional e para o concreto reforçado com fibras de aço em kN.

Tabela 6.3 - Carga máxima aplicada aos corpos-de-prova durante o ensaio de viga

Viga com barra de Ø 10 mm	CC		CRFA		Pcrfa/Pcc
	Pcc (kN)	Média	Pcrfa (kN)	Média	
Viga 1	91,99	91,68	101,5	103,08	1,1
Viga 2	91,99		101,5		1,1
Viga 3	91,99		106,25		1,15
Viga 4	94,84		101,5		1,07
Viga 5	91,99		101,5		1,1
Viga 6	87,24		106,25		1,22

Fonte: autora

Em todas as vigas, a perda de aderência aconteceu por deslizamento da barra de aço dentro do maciço de concreto, como mostrado na Figura 6.3. Observa-se que, para as vigas com fibras, apesar de menores os valores de resistência à compressão, os valores de carga máxima de arrancamento da barra obtidos no ensaio de aderência foram maiores.

Figura 6.3 - Corpos-de-prova de vigas com perda de aderência por deslizamento



Fonte: autora

A partir dos resultados pode-se concluir que:

- Em todos os corpos de prova, as vigas de concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço, perderam a aderência por deslizamento da barra. Esse tipo de ruptura

pode ser justificada por conta da presença do confinamento do concreto ao longo da barra ancorada, por meio da armadura transversal presente nas vigas. A armadura transversal tende a anular ou diminuir as tensões transversais de tração derivadas do fenômeno de ancoragem.

- A presença de fibras no concreto conferiu maior capacidade da carga de ruptura à flexão, mesmo tendo o concreto reforçado com fibras menor resistência à compressão.

6.2.2 Resultados experimentais *versus* modelos teóricos para a curva de aderência *versus* deslizamento

Para a modelagem do comportamento de aderência, através da curva tensão de aderência *versus* deslizamento, muitas pesquisas encontradas na literatura utilizam, para ajustar e validar modelos teóricos existentes, dados experimentais ou análises numéricas.

Neste trabalho, os resultados obtidos no ensaio de viga são comparados com cinco modelos teóricos: BARBOSA (2001), ALMEIDA (2006), CEB-FIP (1990), HUANG et al. (1996), além do modelo para curva tensão de aderência x deslizamento para concreto com fibras proposto por HARAJLI (1995).

De acordo com o modelo de BARBOSA (2001), um valor máximo de deslizamento é apresentado, como indicado na Equação 3.13, que é calculado apenas a partir do diâmetro da barra usada. Usando este deslizamento máximo, é encontrada também a tensão máxima de aderência para construção da curva tensão de aderência x deslizamento, por meio da Equação 3.12. O autor ALMEIDA (2006), propôs equações para modelagem que leva em consideração características do concreto. Os modelos gerados foram criados para o concreto convencional, concreto auto-adensável e concreto de alto desempenho. Para a construção da curva segundo ALMEIDA (2006), foi usada a expressão exponencial dada pela Equação 3.20.

Para o modelo do CEB-FIP (1990), a partir dos parâmetros usados, de acordo com as condições do concreto e de aderência na Tabela 3.1 é determinada a tensão última de aderência, τ_{max} , e o deslizamento máximo δ_1 . Com estes parâmetros os trechos da curva são traçados utilizando as equações 3.30 à 3.33. O modelo dos autores HUANG et al (1996), utiliza os parâmetros de entrada (Tabela 3.3) aplicados nas equações 3.34 à 3.37 para obtenção da curva tensão de aderência x deslizamento.

No modelo recomendado por HARAJLI (1995), que se baseia nos trabalhos de ELIGEHAUSEN et al (1983), apenas para o concreto com fibras, a curva é dividida em quatro estágios e é obtida através das Equações 3.24 à 3.27.

Devido às dimensões da prensa, os apoios da viga tiveram distância de 42,5 cm, como mostrado nas Figuras 5.24 e 5.25. Foi feito um cálculo diferente do valor da fórmula já dada pela RILEM RC5 (1982) para a tensão de aderência na barra. De acordo com o momento atuante na barra, para distância dos apoios igual a 42,5cm, o novo valor da tensão na barra é dado por:

$$\sigma_s = \frac{0,68 \cdot F}{A_s} \text{ para o modelo de viga usado com } \varnothing = 10\text{mm} \quad (6.01)$$

Com:

F = força aplicada (N);

A_s = área de seção da barra (mm²).

A tensão média de aderência dada pela mesma equação 2.08 no capítulo 2:

$$\tau_b = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{\pi \cdot \varnothing \cdot lb} \cdot \frac{\sigma_s \cdot \pi \cdot \varnothing^2}{4 \cdot \pi \cdot \varnothing^2 \cdot 10} = \frac{\sigma_s}{40} \quad (6.02)$$

E que pode ser reescrita, substituindo a equação 6.01:

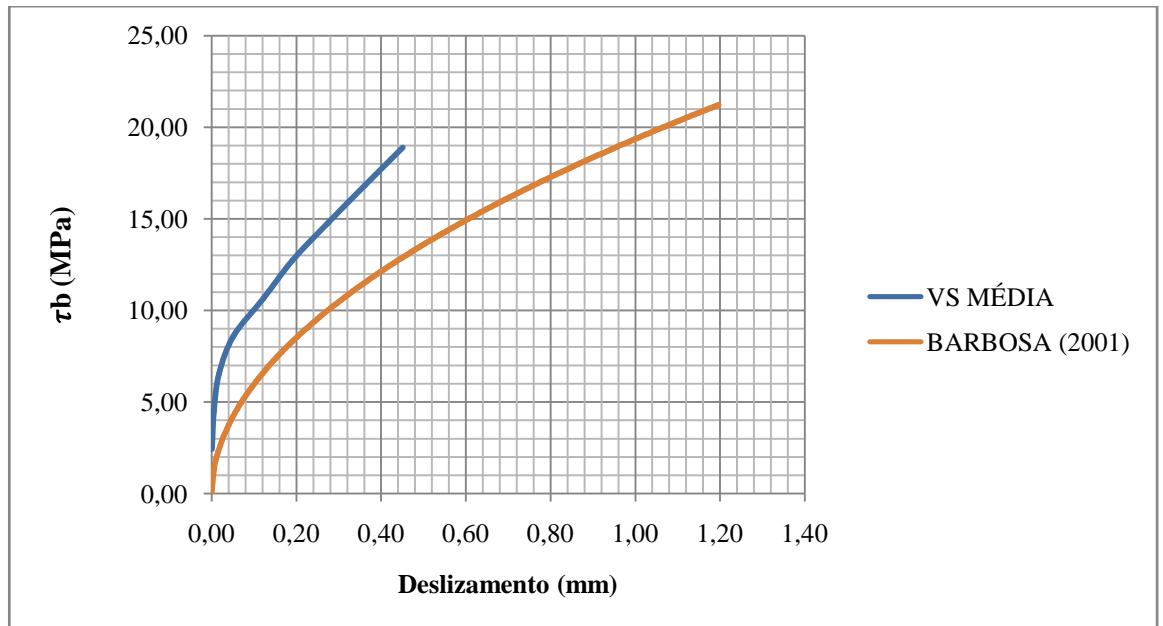
$$\tau_b = \frac{0,68 \cdot F}{40 \cdot A_s} = \frac{0,017 \cdot F}{A_s} \quad (6.03)$$

Abaixo os resultados apresentados nas curvas tensão de aderência x deslocamento para os valores experimentais, com os valores médios dos corpos de provas, e os modelos teóricos, para as vigas com fibras e sem fibras.

6.2.2.1 Resultados das vigas sem fibras

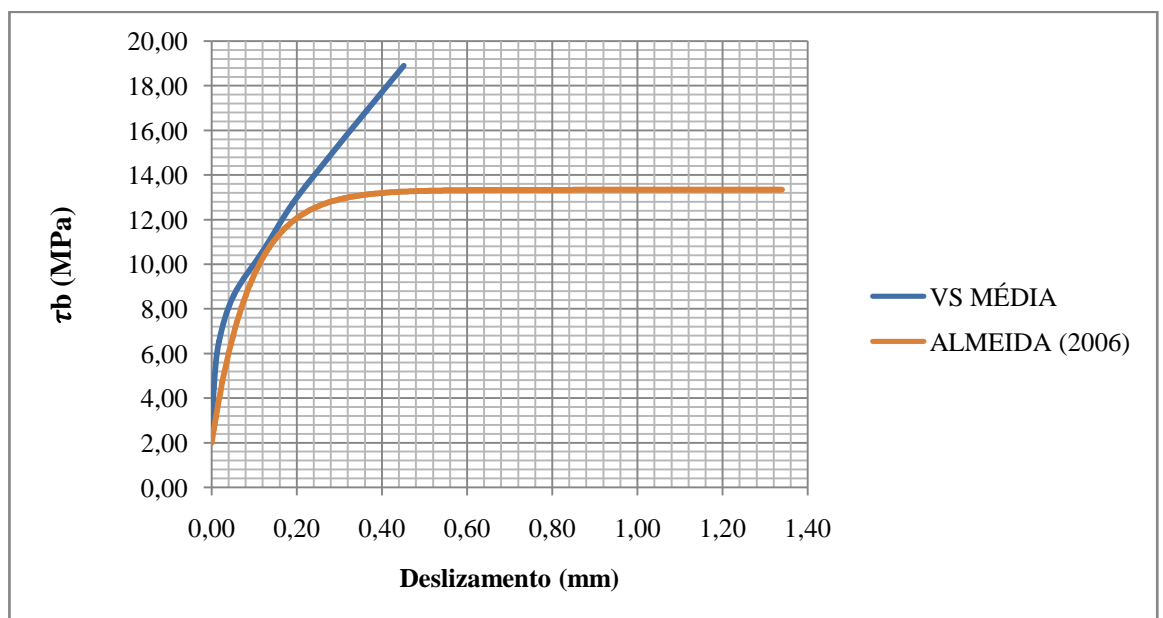
As Figuras de 6.4 à 6.7 apresentam as curvas tensão de aderência x deslizamento para os diferentes modelos teóricos usados e a média experimental.

Figura 6.4 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de BARBOSA (2001)



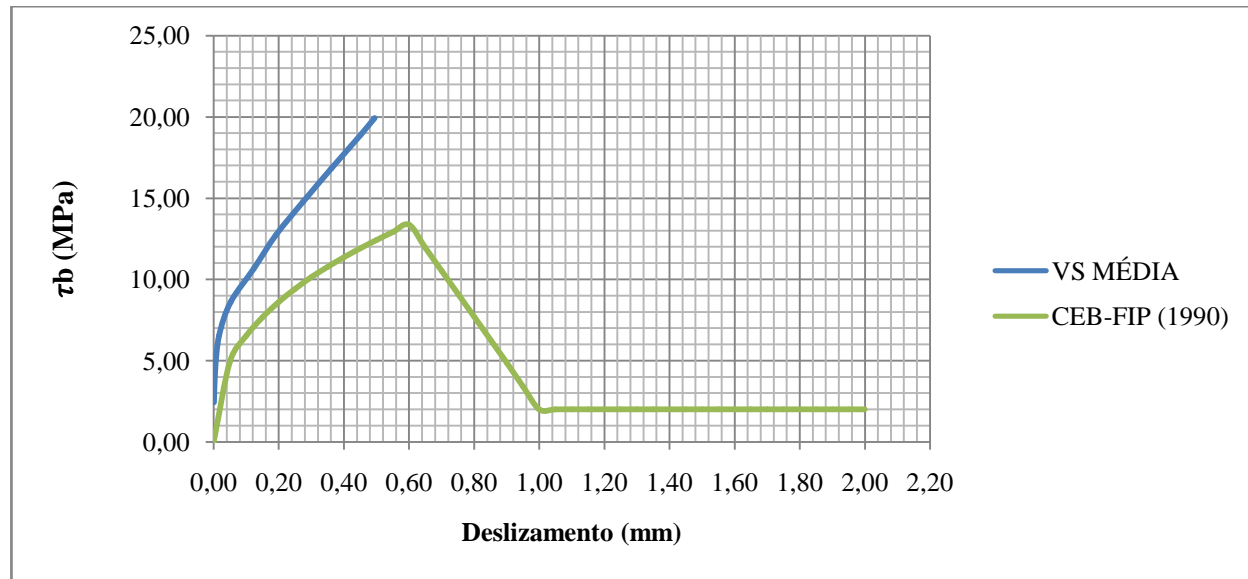
Fonte: autora

Figura 6.5 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de ALMEIDA (2006)



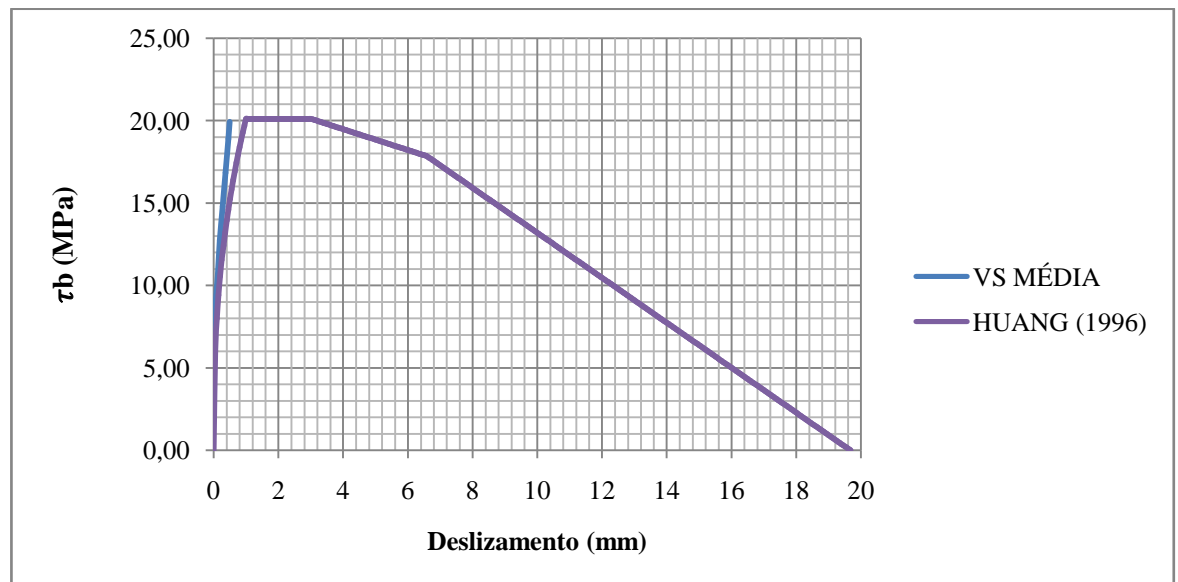
Fonte: autora

Figura 6.6 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelode CEB-FIP (1990)



Fonte: autora

Figura 6.7 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas sem fibras e modelo de HUANG et al (1996)



Fonte: autora

A Tabela 6.4 seguinte mostra os valores obtidos das tensões máximas de aderência experimental e dos modelos teóricos usados para os corpos-de-prova de concreto sem reforço

com fibras. Também indica a diferença em termos percentuais, do valor obtido com os modelos teóricos em relação ao experimental, Δ (variação em porcentagem).

Tabela 6.4 - Valores máximos da tensão de aderência e deslocamento atingidos pelos modelos teóricos e o valor médio experimental da viga sem fibras

Modelo	Tensão Máxima (MPa)	Δ %	Deslocamento máximo (mm)	Δ %
Viga sem fibras – VS MÉDIA	19,92	-	0,495	-
BARBOSA (2001)	21,22	6,53	1,197	141,82
ALMEIDA (2006)	13,33	-33,08	1,340	170,71
CEB-FIP (1990)	13,37	-32,88	0,600	21,21
HUANG (1996)	20,11	0,95	1,000	102,02

$\Delta\%$ = variação em porcentagem

Fonte: autora

Das Figuras 6.4 à 6.7 e a Tabela 6.4, conclui-se que:

- Em relação à tensão de aderência máxima (τ_{\max}):

Os modelos de BARBOSA (2001) e HUANG et al (1996) apresentaram resultados superiores ao experimental, sendo o resultado de HUANG et al (1996) mais próximo com apenas 0,95% de diferença. Já os modelos de ALMEIDA (2006) e CEB-FIP (1990) tiveram valores da tensão última de aderência inferiores em 33,08% e 32,88%, respectivamente. Destaca-se aqui a dificuldade de obtenção da curva completa devido à instrumentação utilizada, não foi possível obter valores pós arrancamento da barra, o que impossibilita uma comparação das curvas experimental e teórica com mais propriedade.

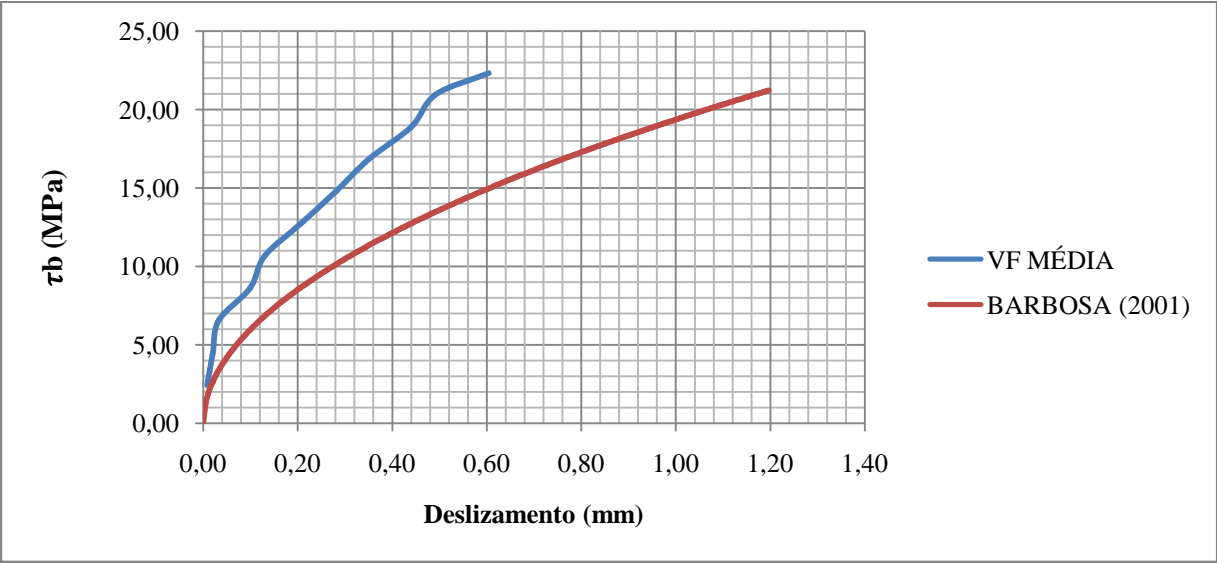
- Em relação ao deslizamento máximo δ_{\max} :

Os deslizamentos de todos os modelos apresentaram valores superiores em relação ao deslizamento experimental. Dois modelos apresentaram resultados superiores ao experimental, sendo que o deslizamento máximo dado por CEB-FIP (1990) foi o mais próximo.

6.2.2.2 Resultados das vigas com fibras

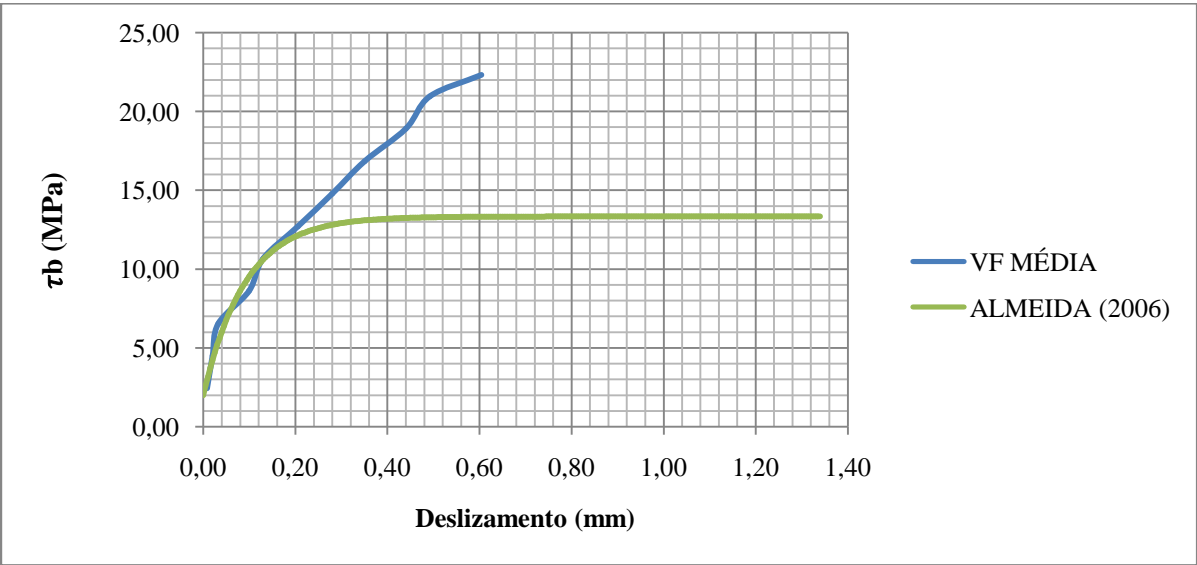
A seguir as curvas tensão de aderência x deslizamento para os cinco modelos teóricos usados e a média experimental para o concreto com fibras, Figuras 6.8 à 6.12. A Tabela 6.5 mostra os resultados da tensão última de aderência e o deslizamento último correspondente.

Figura 6.8 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de BARBOSA (2001)



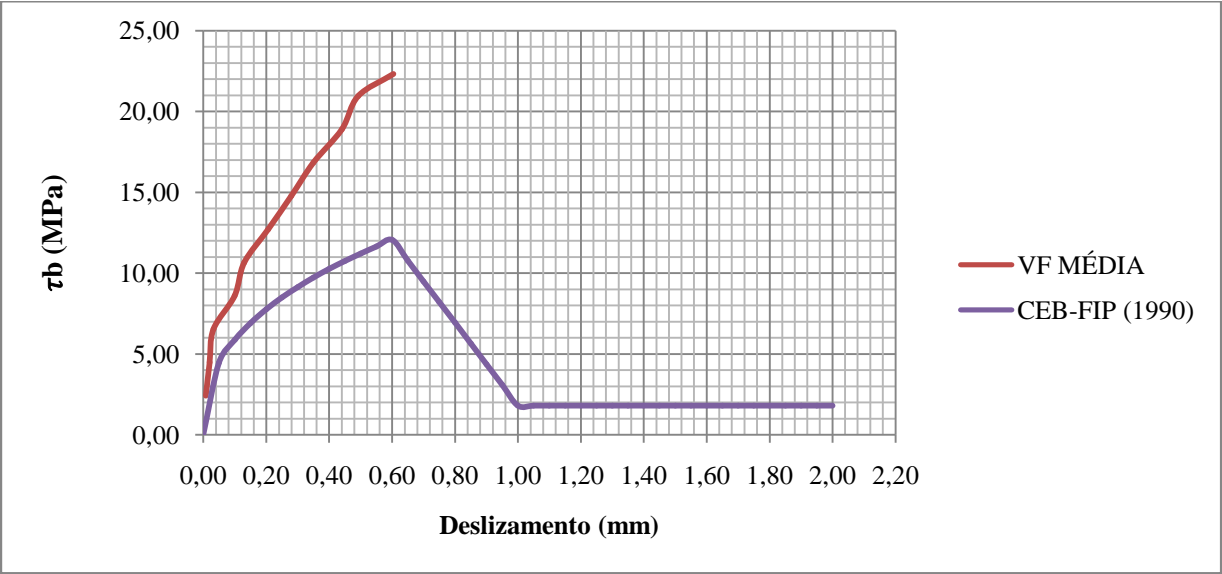
Fonte: autora

Figura 6.9 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de ALMEIDA (2006)



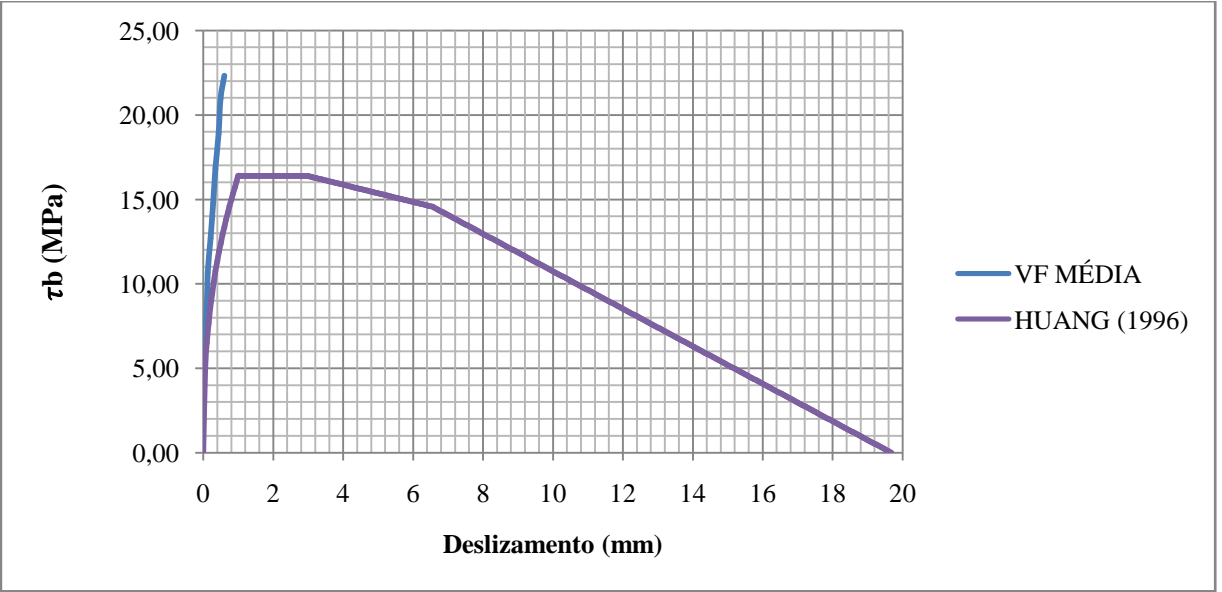
Fonte: autora

Figura 6.10 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de viga com fibras e modelo de CEB-FIP (1990)



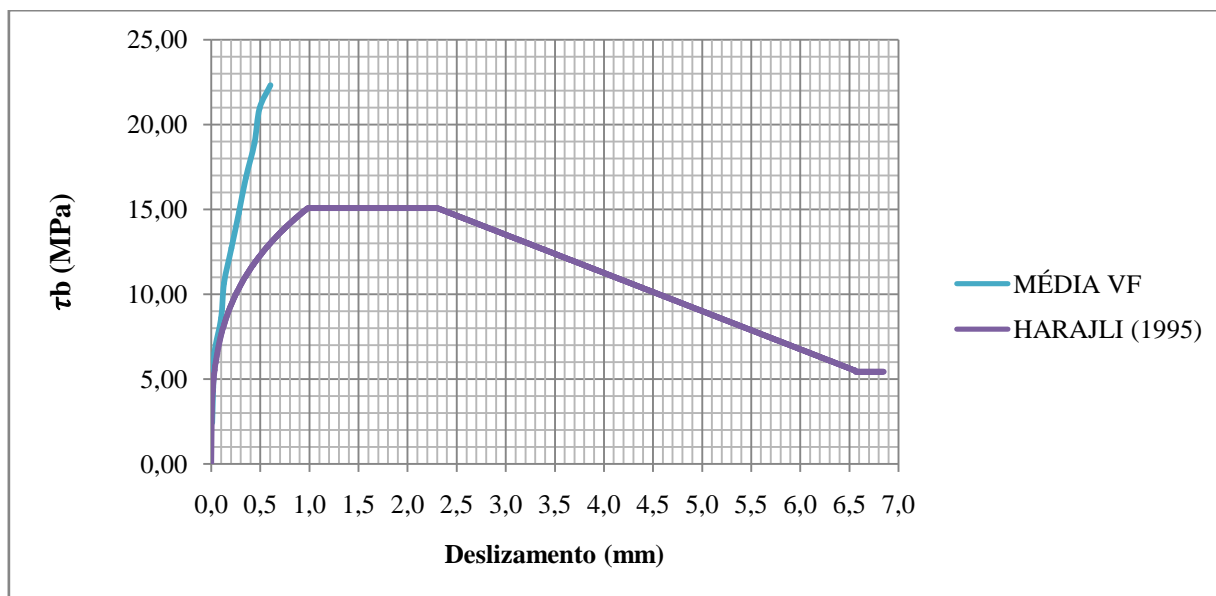
Fonte: autora

Figura 6.11 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de HUANG et al (1996)



Fonte: autora

Figura 6.12 - Curva tensão de aderência x deslizamento do modelo de vigas com fibras e modelo de HARAJLI (1995)



Fonte: autora

Tabela 6.5 - Valores máximos da tensão de aderência e deslocamento atingidos pelos modelos teóricos e o valor médio experimental da viga com fibras

Modelo	Tensão Máxima (MPa)	Δ %	Deslocamento máximo (mm)	Δ %
Viga com fibras - VF MÉDIA	22,32	-	0,604	-
BARBOSA (2001)	21,22	-4,93	1,197	98,18
ALMEIDA (2006)	13,33	-40,28	1,340	121,85
HARAJLI (1995)	15,08	-32,45	1,312	148,68
CEB-FIP (1990)	12,06	-45,98	0,600	-0,66
HUANG (1996)	16,38	-26,61	1,000	65,56

Δ% = variação em porcentagem

Fonte: autora

Das Figuras 6.8 à 6.12 e a Tabela 6.5 pode-se constatar que:

- Em relação à tensão de aderência máxima (τ_{max}):

Todos os modelos apresentaram tensão máxima de aderência menor que o valor experimental, com o valor do modelo proposto por BARBOSA (2001) mais próximo do valor médio dos ensaios, inferior em 4,93%. Entretanto, as curvas obtidas experimentalmente e com o modelo teórico foram distintas. Pode ser visto que o trecho ascendente da curva dada por ALMEIDA (2006) apresentou valores muito próximos ao experimental, contudo há uma diferença significativa após a tensão máxima deste modelo entre as curvas. O modelo do CEB-FIP (1990) apresenta uma curva distinta da obtida experimentalmente, mesmo no trecho ascendente, enquanto a curva obtida através do modelo de HUANG (1996) apresenta semelhança com a curva experimental em parte do trecho ascendente. Apesar do modelo dado por HARAJLI (1995) ser específico para concreto com fibras, a curva obtida apresentou comportamento distinto da experimental, comportando-se semelhantemente à curva obtida com o modelo de HUANG (1996).

- Em relação ao deslizamento máximo δ_{max} :

Para o deslizamento da barra, quase todos os modelos tiveram os valores do deslizamento último superiores ao valor do deslizamento último médio obtido experimentalmente, tendo apenas o modelo de CEB-FIP (1990) com a menor diferença de -0,66%. É importante destacar que os modelos teóricos avaliados não levam em consideração o grau de confinamento dado pela armadura transversal e que esta variável influência de forma significativa, tanto a tensão máxima, como o deslizamento máximo.

6.2.3 Resultados ensaio de viga x ensaio de arrancamento e empuxamento

Com o objetivo de comparar os resultados dos ensaios de viga desta pesquisa com os resultados obtidos com o ensaio de arrancamento e empuxamento para concretos com e sem fibras de cinco autores: ARAÚJO (2016), MELO (2016), SANTANA (2014) e SIMPLÍCIO (2008).

Na pesquisa de ARAÚJO (2016) e MELO (2016), usaram o concreto com mesmos valores de resistência à compressão, para concreto convencional 39 MPa e com fibra de aço 44 MPa. E o mesmo volume de fibras que foi de 0,30%. Estes dois trabalhos realizaram o ensaio de aderência do tipo empuxamento (*push-out test*).

SANTANA (2014) utilizou concreto com resistência característica de 30 MPa e concreto com fibras de aço, em corpos de prova para ensaio de arrancamento, com teor de 1,0%. SIMPLÍCIO (2008) usou fibras de aço de alta resistência, com teor de 1% e concreto de alto desempenho, realizando ensaio de arrancamento do tipo *pull-out*. As Tabelas 6.6 e 6.7, a seguir mostram uma comparação dos dados obtidos nesta pesquisa e dos autores citados.

Para que pudessem ser feitas as comparações dos resultados entre as pesquisas experimentais com diferentes resistências à compressão, foi adotada a relação entre a tensão máxima de aderência e a resistência do concreto, τ_{max} / f_c .

Tabela 6.6 - Valores experimentais de tensão de aderência para concreto convencional

Trabalho	f_c (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{max} / f_c	$\Delta \%$
A AUTORA	44,7	19,9	0,45	-
ARAÚJO(2016)	39,2	18,3	0,47	4,4
MELO (2016)	39,2	18,3	0,47	4,4
SANTANA (2014)	36,8	15,2	0,41	-9,7
SIMPLÍCIO (2008)	64	35,9	0,56	24,4

$\Delta\%$ = variação em porcentagem

Fonte: autora

Tabela 6.7 - Valores experimentais de tensão de aderência para concreto reforçado com fibras de aço

Trabalho	f_c (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{max} / f_c	$\Delta \%$
A AUTORA	36,4	22,32	0,61	-
ARAÚJO(2016)	44,1	18,45	0,35	-26,0
MELO (2016)	44,1	18,45	0,35	-26,0
SANTANA (2014)	38,9	19,84	0,5	-18,0
SIMPLÍCIO (2008)	67,6	49,90	0,73	19,6

$\Delta\%$ = variação em porcentagem

Fonte: autora

De acordo com as Tabelas 6.6 e 6.7, a tensão máxima obtida levou a valores da relação τ_{max} / f_c muito próximos em relação aos outros pesquisadores, com exceção do trabalho de SIMPLÍCIO (2008). Essas diferenças podem ser observadas e explicadas por conta de fatores como características e composição do concreto, tipo de ensaio, idade dos ensaios e até propriedades das fibras. Para o concreto sem fibras os resultados experimentais que mais se aproximaram foram os de ARAÚJO (2016) e MELO (2016). Para os resultados do concreto reforçado com fibras, a pesquisa de SANTANA (2014) teve os resultados mais próximos,

menores que 18%. Assim como, os resultados de SIMPLÍCIO (2008), 19,6% maiores que os resultados para o concreto com fibras desta pesquisa. No caso do concreto com fibras, as diferenças nos resultados dos ensaios podem ser explicados pela diferença dos percentuais e tipo de fibra utilizados nos trabalhos dos demais autores. MELO (2016) e ARAÚJO (2016) empregaram teor de 0,3%, enquanto SIMPLÍCIO (2008) e SANTANA (2014) utilizaram 1%.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas posteriormente aos resultados e a análise experimental e dos modelos teóricos da aderência entre o aço e concreto feita no capítulo anterior.

A ligação da barra de aço e concreto é de imprescindível relevância no desempenho do concreto armado como material estrutural. O estudo desta propriedade é complexo e ainda merece ser exaustivamente estudado, especialmente pelo emprego de materiais novos, como o concreto com adição de fibras.

O objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito da incorporação de fibras e do modelo de ensaio de viga que apresenta poucos trabalhos, no comportamento da aderência. No estudo foi realizado o ensaio de flexão (*beam test*) que representa o que ocorre nas zonas de ancoragem das armaduras de tração das vigas fletidas, sendo alcançados os valores de tensão de aderência que em seguida foram comparados com os modelos teóricos.

Na comparação das curvas tensão de aderência x deslizamento entre os resultados experimentais e teóricos, verificou-se uma diferença no comportamento que pode ser explicada pela origem desses trabalhos, para a produção dos modelos teóricos e as variáveis empregadas na obtenção dos mesmos.

As conclusões atingidas na pesquisa através dos dados dos ensaios executados estão apresentadas a seguir, e são válidas para as condições da pesquisa, dentro do universo das variáveis estudadas.

Propriedades do concreto

- A incorporação de fibras metálicas no concreto modificou a consistência, promovendo diminuição dos valores de *slump*. O concreto reforçado com fibras teve valor menor em 6.7% que o concreto de referência;
- Houve diminuição da resistência à compressão média em 18,57% do concreto reforçado com fibras provavelmente por conta da má distribuição das fibras nos corpos de concreto e diminuição da trabalhabilidade.

Ensaio de aderência

- Todos os corpos de prova do ensaio (vigas) apresentaram ruptura por arrancamento, comum em concreto com confinamento;
- A adição de fibras metálicas no concreto apresentou boa influência na tensão última de aderência. Foi observado que houve acréscimo, com valor médio superior em 12% da tensão máxima para as vigas com concreto fibroso;
- Os corpos de prova de concreto com menor resistência à compressão não ocasionou valores maiores de tensão máxima de aderência (τ_{max});
- Em relação ao deslizamento das barras, as vigas com fibras apresentaram valores de deslizamento maiores. Possivelmente a presença de fibras foi responsável por uma diminuição no processo de fissuração, aumentando a aderência entre barra de aço e concreto.

Modelos teóricos

- De maneira geral todos os modelos empregados para os dois tipos de concreto, com e sem reforço fibroso, foram favoráveis à segurança, com valores menores que os resultados experimentais;
- Dos modelos para concretos sem fibras, o de HUANG et al. (1996) foi o que apresentou valor da tensão última de aderência mais próximo do valor experimental. O modelo de BARBOSA (2001) também forneceu boa aproximação do valor da tensão máxima de aderência para o concreto com fibras;
- Nenhum dos modelos avaliados representou bem a curva tensão de aderência x deslizamento.

Resultados experimentais

- Os resultados experimentais encontrados em outras pesquisas comparados com este trabalho, não apresentaram diferenças significativas, com ressalvas para os valores de

SIMPLÍCIO (2008) que usou fibras com resistência à tração alta e concreto de alto desempenho;

- Os dados experimentais encontrados por ARAÚJO (2016) e MELO (2016) foram os mais próximos para o concreto convencional. E dos resultados para o concreto com fibras, os de SANTANA (2014) mais se aproximaram;
- Em relação ao tipo de ensaio, para a resistência à compressão e diâmetro da barra estudada, não há diferença significativa entre as tensões máximas de aderência obtidas com os três tipos de ensaio (arrancamento, empuxamento e de viga), para o concreto simples;
- Para o concreto reforçado com fibras, as diferenças encontradas ficaram em torno de 20%. Entretanto, devido à escassez de resultados de ensaios de outros autores, não se pode afirmar que há semelhança entre os ensaios de viga, arrancamento e empuxamento.

Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar a influência de teores de fibras maiores que 1%, já que para este teor não houve mudança significativa do comportamento de aderência;
- Verificar para outros diâmetros de barra de aço diferentes, na aderência entre o aço e o concreto;
- Analisar o comportamento de aderência para variados valores de resistência à compressão do concreto para o ensaio de viga;
- Realizar ensaios de arrancamento com as variáveis estudadas e comparar com os resultados obtidos neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, ABNT, 1998.

_____. **NBR 5738:** Concreto –Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

_____. **NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto, ABNT, 1997.

_____. **NBR 15530:** fibras de aço para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2007;

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 544.** State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete. Detroit, USA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). **ASTM C-234:** standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced steel. Philadelphia.

ALMEIDA, F. M. F. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concreto auto-adensáveis.** Tese da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho.** Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ARAÚJO, A. C. J. C. **Estudo da aderência de barra de aço em concreto convencional e concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, São Cristóvão: SE, 2016.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia: MG, 2014.

American Society for Testing and Materials - **ASTM C234 (1991). Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel.** West Conshohocken.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento de aderência em concretos de diferentes classes de resistência.** Tese de Doutorado da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites.** London:Elsevier Applied Science. 1990.

BOSCO, V. I. D; SILVA, B. V; TROJAN, P; BARBOSA, M. P; FILHO, L. C. P. S. **Comparativo experimental entre os métodos de ensaios *pull-out* e *push-out* para determinação da tensão de aderência aço-concreto.** 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Maceió, 2012.

BRISOTTO, D. S. **Um modelo elástico-plástico para a análise da aderência em peças de concreto armado.** Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS, 2011.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. **Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2008.

CASTRO, C. M. **Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. Dissertação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

____ **CEB-FIP Model code 1990**. Bulletin d'information –Thomas Telford, London, 1993.

CORREIA, V. C. **Estudo da influência do uso de fibras de aço e de estribos no comportamento da ancoragem de barras**. Dissertação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos: SP, 2012.

CORNEJO, A. L. **Nuevas Tendencias em los Revestimientos de Túneles**. Revista de Obras Públicas, Madrid, Espanha, 2007.

COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de aço impregnada por polímero**. Dissertação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos: SP, 2007.

DUMÊT, T. B. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. 330p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ELIGEHAUSEN, R.; POPOV, E. P.; BERTERO, V. V. **Local bond stress-slip relationship of deformed bars under generalized excitations**. Report no UCB/EERC - 83/23, University of California, Berkeley. 162p, 1983.

FERNANDES, R. M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto.** Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

FERREIRA, N. F. M. **Influência das características das fibras no desempenho do betão.** Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil. São Paulo: SP, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço.** Revista Techné, São Paulo: PINI, edição 163, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** Tese de livre docência da Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FUSCO, P.B. **Técnica de armar as estruturas de concreto.**São Paulo: Pini, 1995.

GANESAN, N.; INDIRA, P.V.; SABEENA, M.V. **Bond stress slip response of bars embedded in hybrid fibre reinforced high performance concrete.** Elsevier:Construction and Building Materials 50, India, p108–115, 2014.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concreto reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre: RS, 2005.

GOTO, Y. **Cracks formed in concrete around deformed tension bars.** ACI Journal, v.68, n.4, p.244-251, Apr, 1971.

HARAJLI, M. H.; HOUT, M.; JALKH, W. **Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete.**ACI Materials Journal, v.92, n.4, p.343-354, 1995.

HUANG, Z.; ENGSTRON, B.; MAGNUSSON, J. **Experimental investigation of the bond and anchorage behavior of deformed bars in high strength concrete.** 4º International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete. Proceedings, v.3, p.29-31. Paris, 1996.

LE HUANG; YIN CHI; LIHUA XU; PING CHEN; AOLI ZHANG. **Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading.** Elsevier: Construction and Building Materials 103, China, p 77–92, 2016.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado.** v.1. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto.** Tese apresentada no programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: RJ, 2005.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1ª ed., São Paulo: PINI, 1994.

MELO, F. M. C. **Estudo experimental da aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, São Cristovão: SE, 2016.

NAAMAN, A. E. **Engineered Steel fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites.** Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute. v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003

NUNES, N. L., AGOPYAN, V. **Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto com fibras.** Boletim Técnico BT/PCC/255 do Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço.** Tese Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via Método dos Elementos Finitos.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: RS, 2007.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland.** 14 ed. São Paulo: Globo, 2005.

RAMLI, M.; DAWOOD, E.T. **High-strength flowable mortar reinforced by steel fiber.** Slovak Journal of Civil Engineering, v. XIX, no 3, pg. 10-16, 2011.

RHEM, G.; ELIGEHAUSEN, R. **Bond of ribbed bars under high cycle repeated loads.** ACI Journal, Symposium Paper, n76-15, p. 297-309, 1979.

RILEM RC5, TC9-RC. **Bond test for reinforcement steel: 1. Beam test.** RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1982.

RILEM RC6, TC9-RC. **Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test.** RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1983.

RODRIGUES, P.P.F. **ET-67 Parâmetros de dosagem do concreto.** 2. Ed. São Paulo, ABCP, 1995.

ROSSI, N. **Resistência de aderência concreto-aço: efeitos da resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência.** Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas: SP, 2002.

SANTANA, I. V. **Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de diferentes classes de resistência.** Dissertação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, 2014.

SANT'ANA, M. V. P. **Modelo Numérico para concreto reforçado com fibras**. Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes: RJ, 2005.

SILVA, B. V. et al. **Investigação experimental sobre o uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto. Parte 2: APULOT**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. São Paulo, vol. 7, nº 5, p. 856-878, 2014.

SIMPLÍCIO, M. A. S. **Estudo sobre aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras**. Tese do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife: PE, 2008.

SOROUSHIAN, P; CHOI, K. B. (1989). **Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete**. ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 2, Mar-April, p. 217-222.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. Society of Manufacturing Engineers. Dearbon, Michigan, 2 ed, 2008.

TAVARES, A. J. **Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios *pull-out* e *apulot***. Dissertação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira: SP, 2012.

TOJAL, T. **Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas**. Dissertação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Maceió: AL, 2011.

WEILER, B., GROSSE, C. **AUSZIEHVERHALTEN VON FASERN IN STAHLFASERBETON**. Otto-Graf Journal, Universität Stuttgart, Deutschland, 1996.
Disponível em:

<http://www.mpa.unistuttgart.de/publikationen/otto_graf_journal/ogj_1996/beitrag_weiler.pdf> Acesso em: 12 julho de 2015.

YAZICI, S; AREL, H. S. **The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRC**; Construction and Building Materials, Elsevier, Turkey, 2012.